



GRADO EN INGENIERÍA EN DISEÑO INDUSTRIAL Y DESARROLLO DE PRODUCTOS  
ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES

# DESARROLLO DE RECUBRIMIENTOS DE METAL-CERÁMICA PARA MEJORAR LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS MOLDES DE INYECCIÓN

Convocatoria: Julio 2014

**Autor**

Belén Navarro Ferrándiz

**Director**

Clemente Martin Branchadell

Iván Cervera González

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
1. Introducción.....	1
1.1 Objeto.....	1
1.2 Alcance y justificación.....	1
2. Antecedentes.....	3
2.1 El problema del desgaste.....	4
2.1.1 El desgaste en los moldes.....	3
2.2 La tribología.....	5
2.2.1 La fricción.....	5
2.2.2 Topografía de superficies.....	8
2.2.3 El desgaste.....	10
2.2.3.1 Evolución del desgaste.....	10
2.2.3.2 Tipos de desgaste.....	11
2.3 Soluciones para el desgaste.....	13
2.3.1 Recubrimientos.....	15
2.3.1.1 Proyección térmica.....	15
2.3.1.1.1 Microestructura.....	17
2.3.1.1.2 Parámetros.....	18
2.3.1.1.3 Técnicas de la proyección térmica.....	19
2.3.1.2 Material a proyectar.....	22
3. Normas y referencias.....	24
3.1 Normas aplicadas.....	24
3.2 Bibliografía.....	25

4. Definiciones y abreviaturas.....	26
5. Requisitos de diseño.....	27
5.1 Recomendaciones de geometrías.....	27
5.2 Proceso generalizado para la recuperación de moldes.....	28
6. Planificación .....	31
7. Parte experimental.....	33
8. Análisis de soluciones.....	41
9. Aplicación del recubrimiento en un molde.....	54
10. Conclusiones.....	55
11. Planos.....	56
12. Pliego de condiciones.....	58
12.1 Condiciones y parámetros en la realización de los ensayos en el laboratorio.....	58
13. Viabilidad.....	60
12.1 Viabilidad técnica.....	60
12.2 Viabilidad económica.....	60
12.3 Viabilidad legal.....	60
14. Estado de mediciones y presupuesto.....	61

## 1. Introducción

### 1.1 Objeto

El objetivo del proyecto es desarrollar un recubrimiento, a partir de una aleación comercial, con la intención de reducir su comportamiento frente al desgaste, y después recubrir un molde de inyección para alargar su vida útil.

Para realizar la investigación, se partirá de una superaleación comercial de base níquel (NiCrBSi), añadiendo unas cantidades concretas de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de zirconio ( $\text{Zr}_2\text{O}_3$ ). Se estudiará y analizará el coeficiente de fricción y el comportamiento frente al desgaste, con la ayuda de un tribómetro.

Una vez estudiados los distintos recubrimientos que tenemos, y sabiendo que se proyectará mediante la técnica de proyección térmica, en la variante oxifuel, estudiaremos los parámetros y los requisitos de diseño, a tener en cuenta a la hora de aplicarlo sobre la superficie del molde.

### 1.2 Alcance y justificación

El proyecto parte de un problema actual muy importante, el desgaste en los materiales, concretamente nos centraremos en los moldes de inyección.

En la industria, cada vez se quieren piezas con mejores características, prestaciones, calidad, precisión etc, esto afecta directamente a los procesos de fabricación. Un factor muy importante en la industria, respecto a los procesos de fabricación, es el coste, ya que este se refleja directamente en el producto final. Por lo tanto, es necesario que los utillajes y maquinaria más sofisticados duren el máximo tiempo posible.

El proceso de conformado por inyección, ha adquirido una gran importancia en la ingeniería de fabricación, gracias a las múltiples ventajas que tiene. Uno de los grandes inconvenientes, es el coste de los moldes, debido a que trabaja en condiciones muy severas, se fabrican con materiales muy costosos, y la precisión es muy exigente. Por lo tanto, es necesario hacer todo lo posible para que su vida útil sea lo más duradera posible.

Evidentemente, el lugar con mayor desgaste es la superficie, en el caso de la inyección, la cavidad donde se inyectará el material semifundido. Esta superficie se puede tratar como una parte distinta, ya que tiene propiedades diferentes al material base.

Las modificaciones de las características de la superficie, se puede hacer mediante tratamientos termoquímicos o mediante recubrimientos.

Debido a sus ventajas y a su crecimiento actual, se estudiará la proyección térmica, una técnica con multitud de aplicaciones y, con la gran ventaja de que se puede recubrir y proyectar casi todo tipo de materiales.

Por lo referente al alcance del proyecto, es bastante alto, ya que la intención es reducir el desgaste en superficies que trabajan con mucha fricción, y actualmente existen muchas piezas que trabajan en condiciones muy severas. Por lo tanto, dentro de nuestro alcance entrarían, por ejemplo, muchos componentes mecánicos con movimiento como: rodamientos, frenos y embragues, sellos, engranajes, levas y turbinas. Evidentemente, según la prestación se deberá realizar alguna modificación, de variante de la proyección térmica o de parámetros.

## **2. Antecedentes**

### **2.1 El problema del desgaste**

El desgaste de los materiales, es un tema que desde siempre se ha estudiado y se ha tenido en cuenta, en mayor o menor medida, pero conforme avanza la industria y se van fabricando piezas que trabajan en condiciones más severas y a las que se les piden mayores prestaciones, ha sido necesario investigar más sobre este tema.

Es importante profundizar más, ya que después de tantos estudios sobre los materiales y la fabricación, es muy importante mantener las propiedades y en las mejores condiciones los productos, durante el mayor tiempo posible.

El desgaste en la industria provoca una pérdida de tiempo, de material y de energía. Ya que hay que detener la producción, reparar o fabricar nuevas piezas... Todo esto conlleva una pérdida de dinero.

Las grandes pérdidas económicas ocasionadas por la degradación de materiales, de lo que ya existen múltiples estudios en diversos países, ha impulsado a estudiar más a fondo la tribología, para reducir todo lo posible estos efectos.

Dentro de la degradación de materiales, se incluyen varios conceptos, en esta investigación nos centraremos en el desgaste. Este proceso, provoca una pérdida de material en los cuerpos cuando estos se encuentran en un movimiento relativo, debido a la fricción de que sufren las superficies.

Algunas de las consecuencias del desgaste en la industria son: la retirada de la maquinaria prematuramente, pérdidas de potencia, aumento del coste y tiempo que implica la reparación o cambio de una pieza e incremento del uso de lubricantes.

El objetivo es, tanto evitar que se produzca el desgaste, en la medida de lo posible, así como reparar los componentes ya dañados. Para poder garantizar el correcto funcionamiento de la maquinaria y evitar el envejecimiento prematuro, teniendo en cuenta que, tiene que ser a un coste razonable.

### 2.1.1 El desgaste en los moldes

De entre los procesos de fabricación de piezas, la inyección ocupa un lugar muy importante dado que posee múltiples ventajas: piezas de gran calidad, con geometrías complejas, entre otras.

El proceso de inyección, consiste en calentar un material hasta su estado fundido e inyectarlo, haciéndolo pasar a través de una boquilla, mediante presión en la cavidad un molde, donde se enfría y finalmente se expulsa la pieza ya conformada.

Al inyectarle materiales con tanta presión y, muchas veces materiales muy abrasivos, se produce en el molde un desgaste bastante grande. Las consecuencias del desgaste de los moldes de inyección son: la pérdida de material y con ello pérdida de precisión. El desgaste no afecta solamente al molde, sino que se ve reflejado directamente en la pieza: la pérdida de calidad en las piezas fabricadas así como de las tolerancias obtenidas.

Las herramientas y utillajes en la inyección son muy caras, debido al material tan específico con el que se deben fabricar y a la gran exactitud que debe tener.

Los moldes son fabricados con aceros especiales para que puedan aguantar las altas presiones de cierre y de inyección. Para ahorrar materiales muchas veces se construyen de dos tipos de aceros: un blando y otro especial, más duro. El más duro se utiliza únicamente en la parte de la cavidad, o sea, la parte que más sufre. Y el blando para el resto del molde.

El objetivo principal de este proyecto será el rediseño de estos moldes para mejorar su resistencia a desgaste y consecuentemente, alargar su vida útil. Este rediseño se realizará mediante la aplicación de un recubrimiento de altas prestaciones, obtenido por la técnica de proyección térmica.

## 2.2 La tribología

La tribología se encarga de estudiar: la fricción, el desgaste y la lubricación, cuando tenemos dos cuerpos en movimiento.

El objetivo de esta ciencia, es el estudiar el comportamiento de estas superficies, con la finalidad de, mejorar el deslizamiento para que se produzca el menor desgaste posible.

Los objetivos básicos de la tribología son:

- Minimizar el desgaste en las superficies
- Minimizar las fuerzas de rozamiento
- Minimizar la fractura en las superficies

Las consecuencias más importantes que obtenemos al aplicar la tribología son:

- Aumento de la vida útil
- Ahorro de materias primas, de energía y de costes.
- Protección del medio ambiente

En nuestro proyecto, lo que nos interesa es el desgaste. Por lo tanto nos centraremos en este punto. Pero como el desgaste es una consecuencia de la fricción lo primero que haremos será introducir este concepto brevemente.

### 2.2.1 La fricción

La fricción es, la oposición del movimiento entre dos cuerpos. Tenemos una fuerza estática, que debemos vencer para conseguir que haya movimiento.

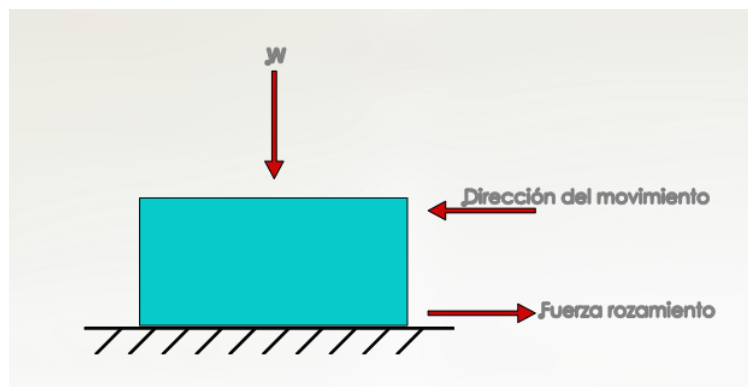


Figura 2.1 Deslizamiento de un cuerpo libre sobre una superficie



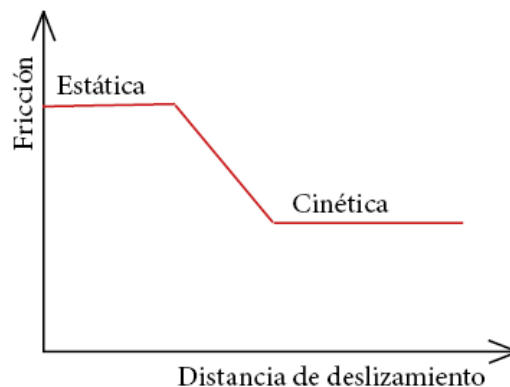
La fricción en sí no es algo negativo, es muy importante en muchas situaciones, como por ejemplo, frenar un coche. Ahora, la fricción cuando no es deseada, puede producir grandes daños y consecuencias que no queremos, un ejemplo claro son los componentes mecánicos de una máquina.

Para medir esta fricción, utilizamos el coeficiente de rozamiento. Este, se ve afectado por varios factores como, entre los más importantes tenemos: distancia que recorre, velocidad, temperatura, rugosidad, tiempo, carga aplicada, y lubricante

En este proyecto únicamente se desarrollarán los cuatro primeros

### *Coeficiente de fricción – Distancia*

En relación con la distancia recorrido, podemos distinguir dos tipos de coeficiente de fricción: el estático y el cinético. Ambos se pueden ver en el siguiente gráfico.



*Figura 2.2. Tipo de fricción en función de la distancia*

La fricción estática, es la primera que tenemos, esta presenta un valor más alto. Por lo que la energía consumida en este tiempo será mayor. Es el momento donde las dos superficies están en reposo y se aplica la primera fuerza para ponerlas en movimiento.

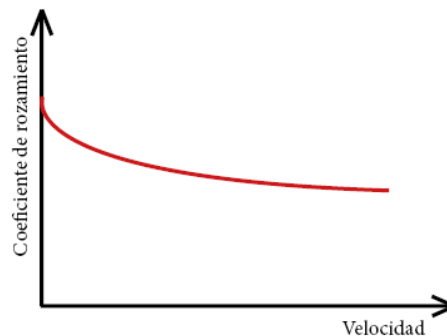
La fricción cinética, va después de la estática, esta es más baja. Y a diferencia de la estática es casi constante, variando muy poco con el tiempo

### *Coefficiente de rozamiento - velocidad*

El coeficiente de rozamiento disminuye con la velocidad, esto es debido al área de contacto entre los dos cuerpos. Cuando la velocidad aumenta, los cuerpos se separan y el área de contacto es menor, por lo tanto hay menor resistencia al movimiento.

El coeficiente de rozamiento respecto a la velocidad tiene un comportamiento exponencial, al principio el coeficiente baja considerablemente pero poco a poco tiende a ser constante.

También hay que indicar que conforme aumentamos la velocidad hay mayores vibraciones y esto hace que aumente la dispersión, es decir, son menos fiables los datos.



*Figura 2.3. Coeficiente de rozamiento en función de la velocidad*

### *Coefficiente de rozamiento – temperatura*

En todo contacto de dos superficies con contacto existe una fricción, que hace que aumente la temperatura. Esta temperatura, conlleva una pérdida de las características resistentes de los materiales

### *Coefficiente de rozamiento – rugosidad*

En función de la rugosidad tendremos un tipo de desgaste u otro, básicamente tendremos dos tipos:

- Desgaste cohesivo
- Desgaste abrasivo, o interferencial

En el siguiente gráfico, podemos ver la relación de estos dos desgaste en función de la rugosidad, en nuestro caso queremos que tenga un desgaste bajo en adherencia.

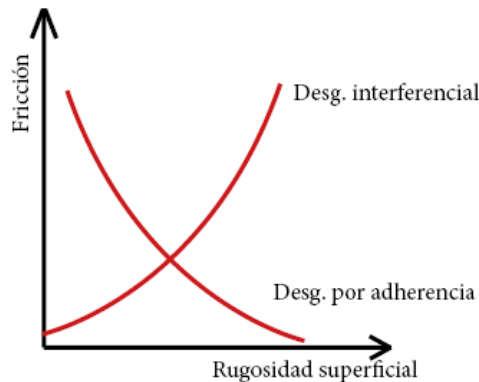


Figura 2.4. Fricción en función de la rugosidad superficial

### 2.2.2 Topografía de superficies

La topografía, desde el punto de vista de ingeniería de los materiales, se encarga de analizar la geometría de una superficie.

El desgaste, no depende únicamente de las propiedades de los materiales, sino de las condiciones en las que se encuentran dichas superficies. Dos factores muy importantes son la limpieza y la rugosidad.

Respecto a la limpieza, es muy importante eliminar la presencia de óxidos o contaminantes, ya que, estos impiden el contacto entre las superficies.

Con respecto a la rugosidad, lo primero que debemos saber es que las superficies planas no existen. En toda superficie tenemos valles y crestas. La rugosidad puede ser clasificada según la longitud de onda como: microrugosidad y macrorugosidad.

Por este motivo, sabemos que, el área de contacto real es mucho menor que el área aparente, debido a, que solo en algunos picos es donde contactan ambas superficies. Esto se puede ver en las siguientes imágenes.

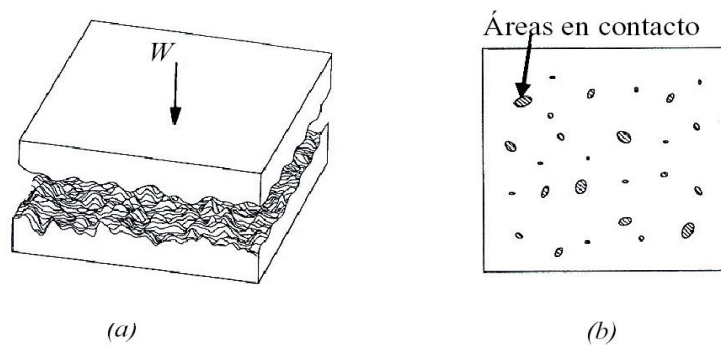


Figura 2.5. (a) Dos superficies rugosas en contacto, (b) áreas en contacto real

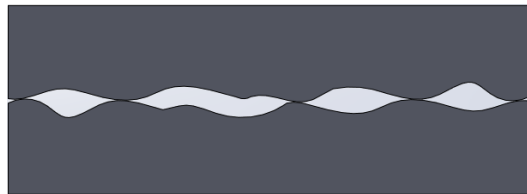


Figura 2.6. Contacto real entre superficies

### 2.2.3 El desgaste

Siempre que existe movimiento relativo entre dos cuerpos bajo presión, se produce un desgaste, en una o en ambas superficies. El desgaste depende de muchos factores: la presión, la velocidad, la rugosidad, el tipo, entre otros.

#### 2.2.3.1 Evolución del desgaste con la distancia

La pérdida de masa, en relación con la distancia de deslizamiento se puede ver en la Figura 2.7.

Se pueden diferenciar dos periodos: un primer periodo de inicial o de rodaje, en el que en un tiempo breve de desgaste, este es muy alto. Va seguido de un segundo periodo estacionario o desgaste lineal estabilizado.

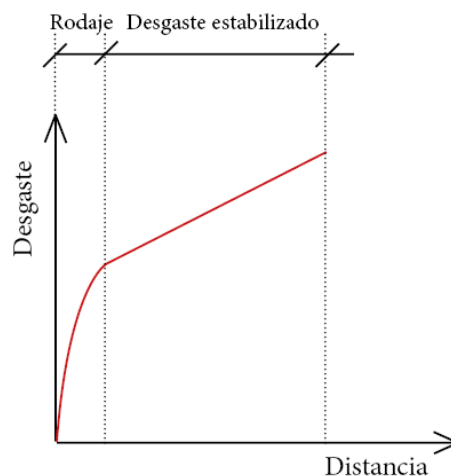


Figura 2.7. Velocidad se desgaste en función de la distancia

### 2.2.3.2 Tipos de desgaste

Dependiendo de la naturaleza o de la carga se pueden distinguir distintos tipos de desgaste: abrasivo, adhesivo, erosivo, corrosivo, por fatiga, por ludimiento, entre otros. Siendo los tres primeros los más importantes.

Normalmente, uno de ellos es el predominante, pero rara vez es único, es decir, en un mecanismo de desgaste suelen haber varios de los tipos mencionados anteriormente.

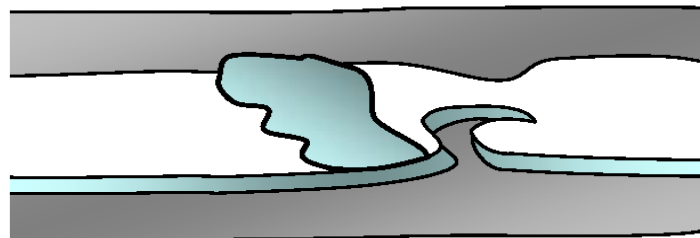
#### *Desgaste por abrasión*

La abrasión, se da cuando, uno de los materiales es de dureza más elevada. Se distinguen dos tipos: de dos cuerpos o de tres cuerpos.

El de dos cuerpos, se da cuando el contacto es, entre dos superficies, el de mayor dureza es el que produce el desgaste en el otro, va grabando pequeños surcos en la superficie que van provocando el desprendimiento del material.

En el de tres cuerpos, existen dos superficies y unas partículas, las cuales se deslizan entre las dos superficies produciendo el desgaste en estas. Muchas veces estas partículas son desprendimientos de los propios cuerpos que están en movimiento.

El volumen de desgaste en la abrasión es, directamente proporcional a la carga y a la distancia e inversamente proporcional a la dureza.

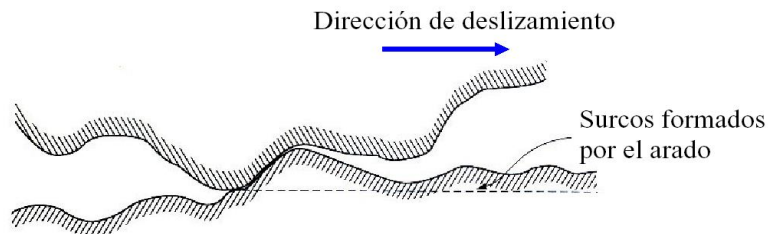


*Figura 2.8. Esquema del desgaste por abrasión*

### *Desgaste por adhesión*

La adhesión se da cuando los picos superficiales que sobresalen en la superficies, fluyen plásticamente y se forman pequeñas soldaduras, debido al calor causado por la fricción, finalmente se rompen por el movimiento, de esta manera se va perdiendo material.

Se puede reducir este desgaste de diversas maneras: con lubricante, evitando el contacto de materiales; mejorando el acabado superficial, para que existan menos crestas.



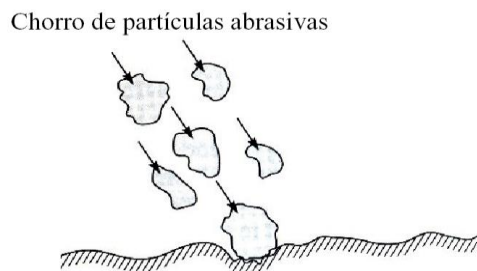
*Figura 2.9. Esquema del desgaste por adhesión*

### *Desgaste por erosión*

El desgaste por erosión se da cuando pequeñas partículas sólidas impactan sobre una superficie, donde tendrá lugar el desgaste.

También se da en medios líquidos, cuando este arrastra pequeñas partículas sólidas, en este caso se llama desgaste erosivo por cavitación.

La intensidad del desgaste dependerá de la forma, tamaño y dureza de las partículas, así como de la velocidad de impacto.



*Figura 2.10. Esquema del desgaste por abrasión*

### *Corrosión*

La corrosión se da por la interacción del material con el medio que lo rodea.

### *Fatiga superficial*

Se da como resultado de las cargas cíclicas, que acaban provocando la aparición y propagación de grietas.

### *Por ludimiento*

Cuando tenemos un movimiento oscilatorio de dos superficies en contacto, como sucede en máquinas donde existe vibración.

### *Cavitación*

La cavitación es el daño provocado por la implosión de burbujas de vapor presentes en un fluido. Debido a las variaciones de presiones en un fluido se producen pequeñas burbujas que al explosionar producen el desgaste.

## 2.3 Soluciones para el desgaste

Tanto para prevenir, como para solucionar desgaste en las piezas, existen muchos métodos distintos.

Se puede, cambiar el material, cambiar el proceso de fabricación o modificar las propiedades de la superficie. Cambiar el material o la fabricación, puede resultar muy costoso y no ser rentable para solucionar el problema, por ello nos vamos a centrar únicamente en las superficies.

Es viable centrarnos únicamente en esta parte, ya que el desgaste de los productos siempre comienza aquí. Los objetivos principales de una superficie son: proteger, decorar y objetivos tecnológicos. Evidentemente, lo que nos interesan son los de protección y los tecnológicos.



Para cambiar las características de la superficie hay varias opciones. Podemos cambiar: la microestructura por ejemplo, el temple; la composición, por ejemplo la carburación; o ambos. Y existen diversos métodos para hacer esto, mediante medios físicos o químicos, con aporte o no de material. Otra posibilidad, muy interesante tecnológica e industrialmente es la aplicación de recubrimientos sobre el material base, que le aporte las características deseadas.

En las figuras 2.11 y 2.12 hay un esquema de algunos métodos para cambiar las propiedades de la superficie, se han dividido en dos bloques: según si son tratamientos superficiales o recubrimientos.

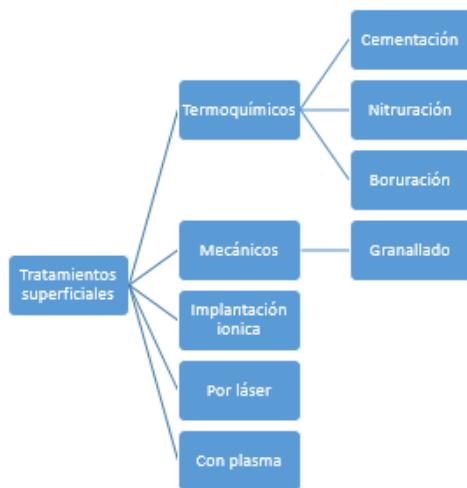


Figura 2.11. Esq. de tratamientos superficiales

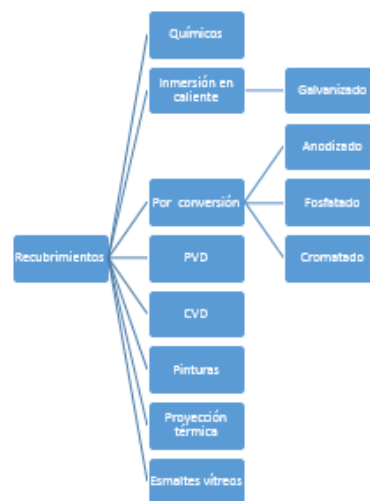


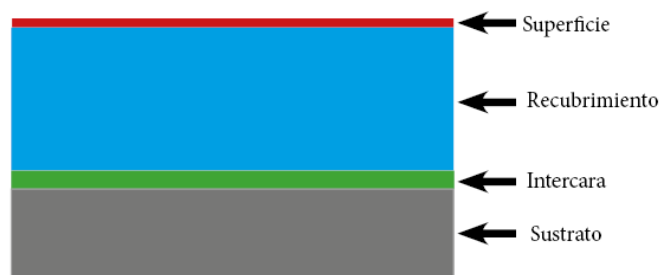
Figura 2.12. Esq. de tipos de recubrimientos

Los costes de recubrir un producto se puede justificar comparando lo que nos cuesta cambiar la pieza en comparación con realizar el recubrimiento.

### 2.3.1 Recubrimientos

En este trabajo se ha optado por la opción de aplicar un recubrimiento, ya que nos puede proporcionar mejores propiedades respecto a la modificación superficial. Las propiedades finales de la pieza, dependen tanto del material de aporte como de las técnicas y los parámetros utilizados.

En estos sistemas, se pueden distinguir cuatro partes fundamentales: sustrato, intercara, recubrimiento y superficie



*Figura 2.13. Partes fundamentales de un recubrimiento*

Existen varios métodos de recubrimiento de superficies: por proyección térmica, deposición de metales en estado líquido (galvanizado), deposición en baños electrolíticos (níquelado, cromado) y recubrimiento mediante pinturas.

Debido a las múltiples ventajas y a su crecimiento actual escogeremos la proyección térmica para la realización de la investigación.

#### 2.3.1.1 Proyección térmica

La proyección térmica es el recubrimiento de una superficie, en la que el material a proyectar se funde total o parcialmente y luego se lanzan contra la superficie. Las partículas proyectadas, salen disparadas como pequeñas bolitas y en el sustrato solidifican y se adhieren formando un recubrimiento.

Las partículas se adhieren porque se proyectan fundidas o semifundidas y al enfriarse se contraen y gracias a la superficie rugosa se van “enganchando”.

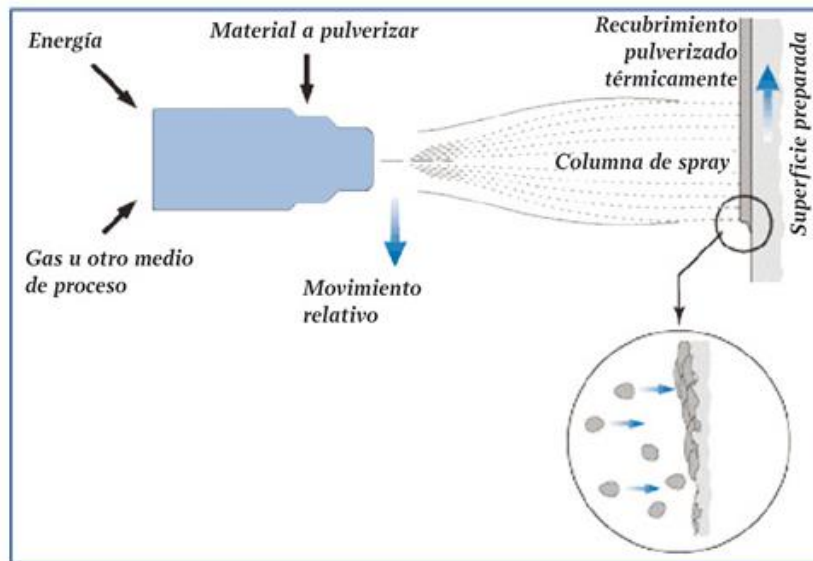


Figura 2.14. Esquema de la proyección térmica

La proyección térmica posee múltiples ventajas, como por ejemplo:

- Recubrimientos de alta calidad
- Permiten recubrir y proyectar casi cualquier tipo de material y aleación
- El proceso es fácilmente automatizable
- Es muy flexible y de muy fácil aplicación
- Gran precisión
- No hay dilución de la capa con el sustrato
- El sustrato no sufre alteraciones térmicas
- Permite la obtención de espesores más grandes que otros métodos: como por ejemplo el PVD, CVD y electrodeposición (se puede llegar hasta las 500 micras).

La aplicación de esta técnica es muy amplia, principalmente se utiliza para:

- Evitar desgaste
- Evitar la corrosión
- Como barrera térmica

Por tanto, se aplican en campos muy variados como turbinas para industria aeronáutica, componentes de motores de automóvil y de máquinas de conformado de materiales, reactores en la industria química y condensadores en la industria electrónica, entre otros.

### 2.3.1.1.1 Microestructura

Entre las características de la microestructura de estos recubrimientos destacan:

#### Densidad y porosidad

Evidentemente la densidad nunca será del 100%, por la presencia de poros y de óxidos. Dependerá del material de aporte, del método de deposición, de las condiciones de deposición y del procesado posterior. Esta porosidad tiene tanto pros como contras dependiendo de para que se vayan a usar.

Entre las ventajas, tenemos: como reservorio para lubricantes, el incremento de barrera térmica, la reducción de los niveles de tensión y el aumento de la resistencia al impacto y del carácter abrasable del recubrimiento.

Y como desventajas: que acelera el proceso de corrosión y el ataque químico, dificulta el proceso de mecanizado y, perjudica las propiedades de resistencia, dureza y resistencia a desgaste.

#### Oxidación

Algunas de las partículas de aporte se oxidan debido a la presencia de aire, la presencia de estos óxidos, como siempre, tiene sus ventajas y desventajas. Entre las desventajas tenemos, que pueden incrementar la porosidad por lo tanto favorecer la corrosión y disminuir su resistencia, y por lo tanto disminuir la maquinabilidad. Entre las ventajas, tenemos, que los óxidos son más duros que el metal originario y por lo tanto proporcionan mayor resistencia al desgaste.

#### Contracciones

Debido a la solidificación, las partículas se contraen, esto genera unas tensiones residuales internas de tracción, que es lo que conlleva al agrietamiento y al desconchado del depósito. Por este motivo los materiales con menor coeficiente de fricción son los más adecuados. Y sobre todo cuando son espesores muy grandes.

Como se ha dicho anteriormente, las características finales del recubrimiento no dependen únicamente de los materiales de la base y del recubrimiento, la técnica utilizada y los parámetros escogidos tienen un gran papel.

### 2.3.1.1.2 Parámetros

Algunos de los parámetros más importantes de la proyección térmica se comentan a continuación:

- Velocidad de proyección (velocidad de las gotas)

En general, cuanto mayor es la velocidad de incidencia de las partículas, mayor es la densidad, la cohesión e integridad del recubrimiento, y, por lo tanto, los recubrimientos obtenidos por HVOF y por detonación son los que ofrecen mayor resistencia al desgaste.

- Tamaño de las gotas

Evidentemente cuanto más pequeñas sean, mayor compactación tendrán, pero también hay que tener en cuenta que solidificarán antes, por lo tanto, no se puede proyectar a baja temperatura o a grandes distancias.

- Temperatura

El control de la temperatura durante la proyección es muy importante, mediante esta técnica tenemos la ventaja de que el sustrato no se calienta demasiado, por lo tanto, no sufre alteraciones térmicas.

Ahora, la temperatura de las partículas a proyectar es muy importante, ya que, a mayor temperatura en las partículas, mayor será la expansión que sufre, por lo tanto mayor la contracción al solidificarse, con los inconvenientes que esto conlleva.

- Espesor de capa

La proyección térmica tiene un rango de espesor bastante grande, desde las pocas  $\mu\text{mm}$  hasta más o menos 500  $\mu\text{m}$ . Se podrá depositar más o menos en función de las técnicas y parámetros escogidos.

- Distancia de proyección

Una vez la partícula sale de la pistola comienza a enfriarse y a solidificarse (desaceleración). No es convenientes distancias muy grandes

En algunos casos se puede realizar un refundido posterior a la proyección. Éste, consiste en calentar el recubrimiento mediante una llama, con la intención de: reducir las tensiones internas, reducir porosidad de los recubrimientos, aumentar la microdureza, incrementar la adherencia recubrimiento- sustrato y homogeneizar la microestructura del recubrimiento

### 2.3.1.1.3 Técnicas de la proyección térmica

Existen diferentes técnicas de proyección térmica, aquí solamente se presentarán las más importantes. Existen diversas maneras de clasificar estas técnicas, nosotros lo haremos atendiendo a la fuente de energía, como se puede ver en la figura 2.15 y 2.16.

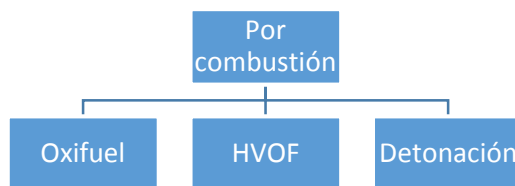


Figura 2.15 Por combustión

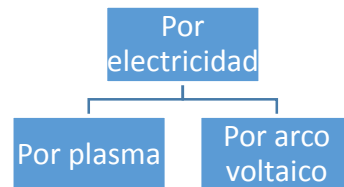


Figura 2.16 Por electricidad

#### Por combustión

##### *Proyección térmica oxifuel*

En la variante oxifuel tenemos una alimentación continua del material hacia la boquilla. Gracias a un combustible gaseoso, por ejemplo, acetileno o propano, se funde el material. Y luego con la ayuda de un gas atomizante, por ejemplo, aire comprimido o nitrógeno, se lanza hacia el sustrato. El material puede estar en forma de polvo o hilo.

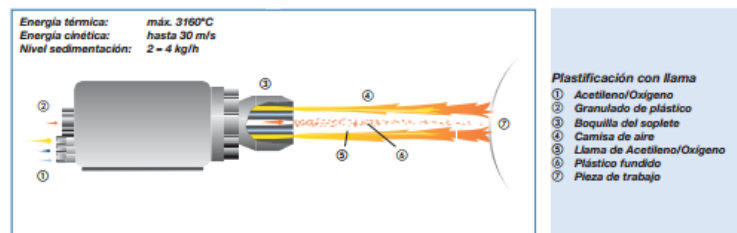


Figura 2.17. Esquema de proyección térmica oxifuel

### *Oxifuel de alta velocidad o HVOF (High Velocity Oxyfuel)*

Es una variante de la técnica oxifuel, al principal diferencia es que la combustión en la variante oxifuel se produce en el aire, mientras que en la de HVOF se produce en el interior de una cámara a grandes presiones.

Utiliza oxígeno, y un gas combustible, normalmente, propano, propileno e hidrógeno. El material es inyectado dentro de la llama, y esta llama sale a gran velocidad. Gracias a las grandes velocidades de proyección se obtienen, recubrimientos muy densos, con gran adherencia y baja porosidad.

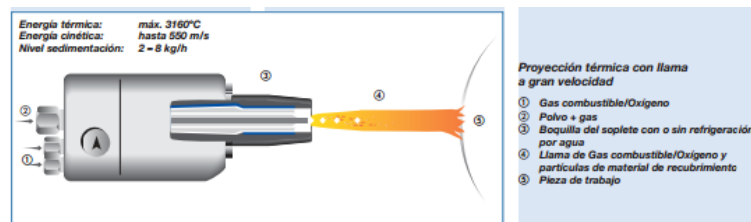


Figura 2.18. Esquema de proyección térmica oxifuel de alta velocidad

### *Detonación*

En la cámara de combustión de esta variante tenemos, oxígeno, acetileno y el material en polvo, con una chispa se consigue la detonación, y la onda producida por esta producirá que las partículas salgan disparadas. Las detonaciones se producen varias veces por segundo.

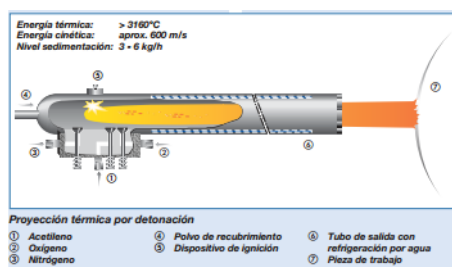


Figura 2.19. Esquema de proyección térmica por detonación

## Electricidad

### Por plasma

El rayo plasma es el encargado de fundir y proyectar el material, este se forma a partir de un arco voltaico, a través de argón, nitrógeno, hidrógeno o una mezcla de ellos.

Se forma un arco voltaico, el cual se encarga de conducir el rayo de plasma, que se encarga de fundir el material. El arco voltaico cede su energía térmica a las partículas que se proyectan.

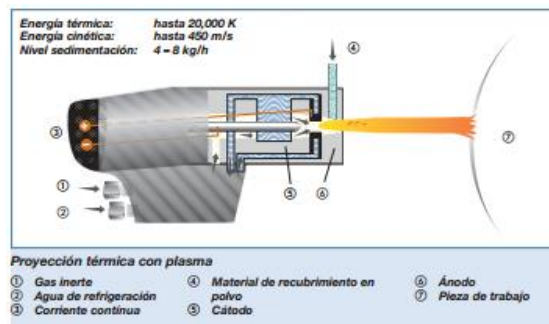


Figura 2.20. Esquema de proyección térmica por plasma

### Por arco voltaico

Tenemos dos hilos que funcionan como arco voltaico, que se encargan de fundir el material. Con la ayuda de un gas pulverizador se dispara el material hacia el sustrato.

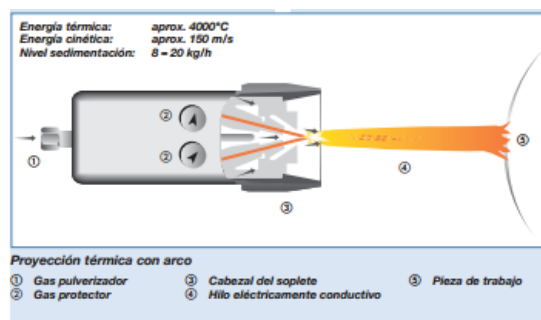


Figura 2.21. Esquema de proyección térmica por arco voltaico



### 2.3.1.2 Material a proyectar

Como se ha dicho anteriormente partiremos de una aleación comercial de base níquel, (NiCrBSi) a la que se añadirán pequeñas cantidades de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Zr}_2\text{O}_3$ . A continuación, se citaran las propiedades más importantes de cada una de ellos de manera individual.

#### **NiCrBSi**

Se trata de una aleación comercial de base níquel, con adición de cromo, boro y silicio. El porcentaje de cada compuesto varía depende de la aplicación para lo que vaya a ser usado, y en nuestro caso, tendrá una composición como se ve en la tabla 2.1.

Ni	Cr	B	Si
83 %	10%	3.5%	3.5%

*Tabla 2.1 .Composición NiCrBSi*

Cada componente en la aleación aporta unas características distintas:

Ni → mejora de ciertas propiedades como, mayor resistencia a oxidación.

Cr → resistencia a la oxidación y a la corrosión de alta temperatura y aumenta la dureza. Resistencia a la abrasión.

B → reduce la temperatura de fusión. Y ayuda en la formación de fases duras. Resistencia a la abrasión.

Si → aumenta las propiedades autofundentes.

La aleación, tiene como características más importantes: la resistencia al desgaste y la capacidad para soportar ambientes corrosivos a altas temperaturas

También tiene propiedades autofundentes, por lo que es muy apropiada para la proyección térmica.

#### **$\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Zr}_2\text{O}_3$**

Lo que queremos agregar al material base son dos cerámicas, se conocen como “cerámicas modernas” y se incluyen dentro de óxidos cerámicos. Tanto la alúmina, como la zirconia, tienen algunas características en común.

Algunas de sus características, que derivan de sus enlaces

- Estabilidad química
- Barrera térmica y eléctrica

Como propiedades mecánicas importantes tenemos

- Elevada rigidez
- Elevado límite elástico
- Ductilidad prácticamente nula
- Puntos de fusión altos
- Bajos coeficientes de expansión térmica → pequeñas dilataciones

Como desventaja de las cerámicas tenemos que son altamente frágiles.

Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

También llamada alúmina. Se trata de un material cerámico. Se encuentra de forma natural en forma de corindón o esmeril, y en la industria se obtiene a partir de la bauxita.

En la siguiente tabla se pueden ver las propiedades más importantes de la alúmina

Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	Temp. de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	Dureza Vickers (HV)	Módulo elástico (MPa)
3,8	2050	2200	345000

Tabla 2.2. Propiedades de la alúmina

Óxido de zirconio ( $\text{Zr}_2\text{O}_3$ )

También llamado zirconia.

Las propiedades más importantes se muestran en la siguiente tabla.

Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	Temp. de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	Dureza Vickers (HV)	Módulo elástico (MPa)
5,7 - 6,1	2680	2500	205000

Tabla 2.3. Propiedades de la zirconia

### **3. Normas y referencias**

#### **3.1 Normas aplicadas**

UNE 157001. Criterios generales para la elaboración de proyectos. Febrero 2002

UNE 50-132-94 Numeración de las divisiones y subdivisiones en los documentos escritos. Enero 1994

UNE-EN ISO 3098-0 Documentación técnica de productos. Escritura. Requisitos generales. Julio 2008

UNE-EN ISO 3098-2 Documentación técnica de productos. Escritura. Parte2: Alfabeto latino, números y signos. Enero 2001

UNE-EN ISO 20-653-82 Limpieza por ultrasonidos. Consideraciones generales. Octubre 1982

UNE – EN 14616. Proyección térmica. Recomendaciones proyección térmica. Febrero 2006

UNE – EN ISO 15520. Proyección térmica. Recomendaciones para diseño de conjunto de elementos de recubrimientos por proyección térmica. Septiembre 2008

UNE 1-032-82 ISO 128. Dibujos técnicos. Principio generales de representación. Diciembre 1962

UNE 1-039-94 Dibujos técnicos. Acotación. Diciembre 1994

UNE-EN ISO 5455. Dibujos técnicos. Escalas

.

### 3.2 Bibliografía

1. Ferrer Giménez, C. y Amigó Borrás, V. (2011). *Tecnología de materiales*. Valencia: Universidad politécnica de Valencia.
2. Sarkar A.D. (1990). *Desgaste de metales*. México: Editorial Limusa S.A.
3. Vázquez, A.J. y De Damborenea, J.J. (2001) *Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos*. Madrid: Csic
4. William D. Callister, Jr. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté.
5. William E. Smith y Javad Hashemi. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México: Mc Graw Hill

## **4. Definiciones y abreviaturas**

A continuación indican las abreviaturas, con su significado. Ordenadas según aparecen en el proyecto.

Ni → níquel

Cr → cromo

B → boro

Si → silicio

esq. → esquema

HVOF (High Velocity oxyfuel) → oxifuel de alta velocidad

µm → micras

g → gramos

cm<sup>3</sup> → Centímetro cúbico

MPa → Mega pascales

mm → milímetros

rpm → revoluciones por minuto

N → newton

m → metro

€ → euros

h → horas

IVA → Impuesto sobre el valor añadido

## 5. Requisitos de diseño de los moldes

### 5.1 Recomendaciones de geometrías

En general, la proyección térmica no presenta problemas a la hora de tamaños y formas, pero si que es verdad que hay que tener cuidado con ciertas geometrías de las superficies a proyectar. En las normas UNE-EN ISO 14616 y UNE-EN ISO 15520 se citan algunas de las recomendaciones que hay que considerar previamente a la proyección.

- Las esquinas deben de ser redondeadas. Ya que las esquinas puntiagudas, actúan como concentrador de tensiones. Además la adherencia es peor, y se concentran más poros en estos puntos.



Figura 5.1. Recomendación. Redondeo de esquinas

- Relacionado con el punto anterior, cuando se mecaniza una parte para proyectar posteriormente, se deben también redondear o hacer un pequeño chaflán.

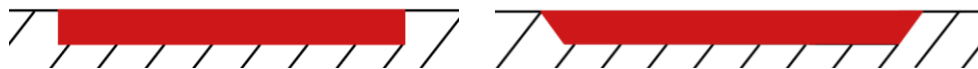


Figura 5.2. Recomendación. Realizar chaflán

- La mejor posición para realizar la proyección es a  $90^\circ$ , aunque hasta un ángulo de  $45^\circ$  sería aceptable. Por lo tanto, en lo que respecta a la proyección de un molde no se podrán realizar zonas donde no sea accesible la pistola y se tenga que girar un ángulo muy distinto al recto.

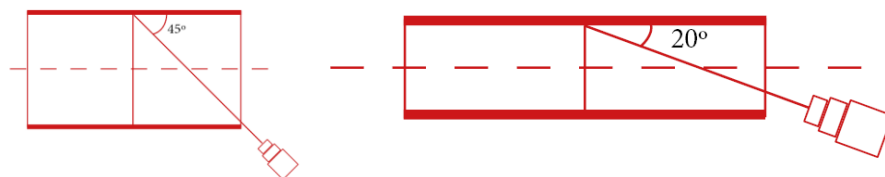


Figura 5.3. Recomendación. Ángulos de proyección

- También habrá que tener cuidado con las distancias, no se pueden proyectar en zonas donde no se puedan guardar la distancia necesaria para realizar la proyección.



*Figura 5.4. Recomendación. Distancias de la pistola*

- También se tendrá cuidado con los agujeros y ranuras, estrechos y ciegos, ya que no se suelen recubrir bien.
- No se pueden hacer detalles muy pequeños ya que no será posible realizar la proyección

## 5.2 Proceso generalizado para la recuperación de moldes

Nuestra finalidad es recubrir las superficies de un molde. Nos podemos encontrar con dos situaciones diferentes: proyección de moldes nuevos o de moldes usados.

**Recubrir nuevos:** al recubrir un molde nuevo, conseguiremos que la vida útil del aumente, reduciendo así costes innecesarios, de cambio o recuperación.

Para los moldes nuevos el plan de actuación sería:

1. Mecanizar: rebajar la superficie, para poder proyectar. Se rebajará el espesor que se desee de capa de recubrimiento.
2. Preparar la superficie como se ha indicado en la parte experimental y proyectar el material. Se proyectará un poco más del espesor de capa deseado, para poder realizar el pulido posteriormente.

3. Pulir la superficie, ya que, para los moldes de inyección, los acabados de las superficies son muy importantes.

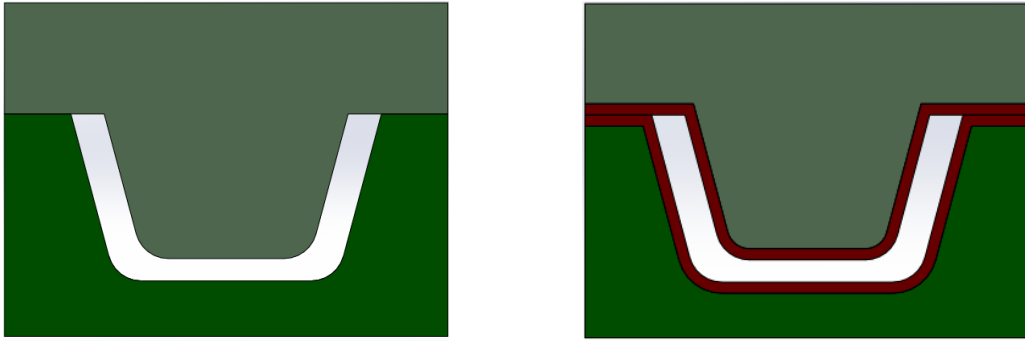


Figura 5.5. (a) Molde nuevo sin recubrimiento y (b) molde nuevo con el recubrimiento aplicado

**Recubrir moldes usados:** en este caso el objetivo es la recuperación de un molde. Es bastante más económico reparar un molde que reemplazarlo.

En función de los daños, será necesario un plan de actuación diferente, aquí se van a distinguir dos casos generales de defectos: los que tienen una superficie desgastada completa; y los que tienen defectos puntuales y muy localizados. En el primer caso se recubrirá entero, y en el segundo únicamente aquella parte dañada.

#### Desgastado en toda la superficie

Si tenemos un molde con bastantes defectos en la superficie, lo mejor es recubrir la superficie entera, para ello se seguirán los siguientes pasos:

1. Medir la profundidad de la grieta más grande.
2. Rebajar en todo el molde la medida de la grieta más grande.
3. Se realizará la proyección.
4. Pulir la superficie.

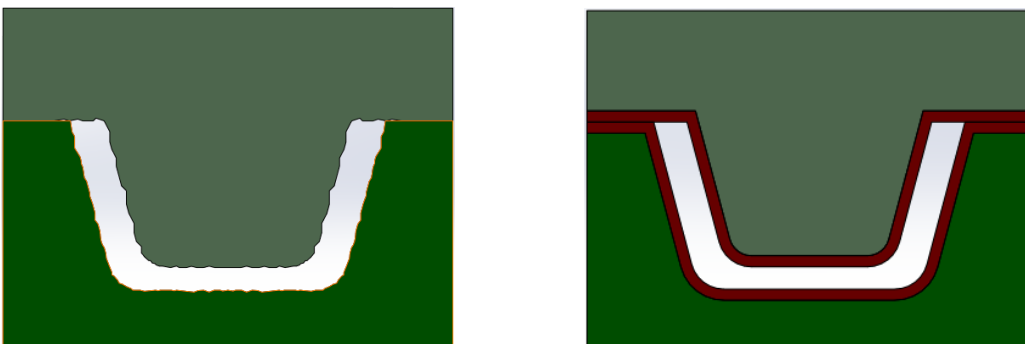


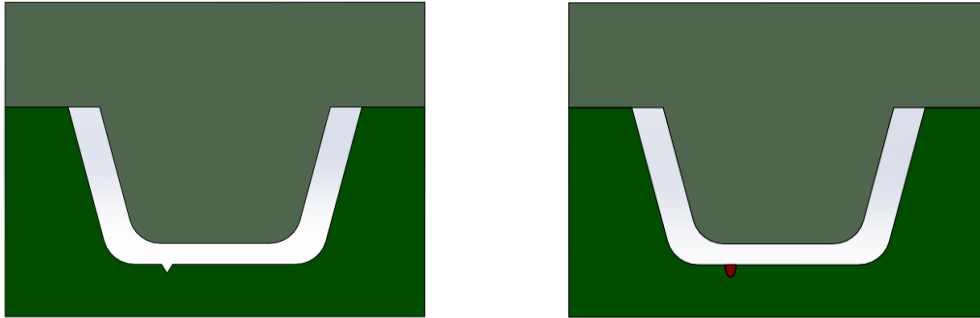
Figura 5.6. (a) Molde con un desgaste en toda la superficie y (b) molde después de recuperarlo



*Molde con defecto puntual*

En este caso tenemos algún defecto puntual y localizable, para este tipo lo que haremos será, únicamente mecanizar esta parte y aplicarle el recubrimiento.

1. Mecanizar, únicamente en la parte del defecto
2. Preparar la superficie y proyectar.
3. Pulir



*Figura 5.7. (a) Molde con un defecto puntual y (b) molde con defecto ya recuperado*

Será necesario enmascarar aquellas partes que no se deseen recubrir. Lo haremos conforme la norma UNE-EN ISO 13507. Se protegerán mediante máscaras. Para ello podremos utilizar: cintas autoadhesivas, madera dura, caucho, goma de silicona o máscaras metálicas. Se tomarán precauciones para asegurar que el material de la máscara no contamina en ningún momento la superficie a proyectar.

## 6. Planificación

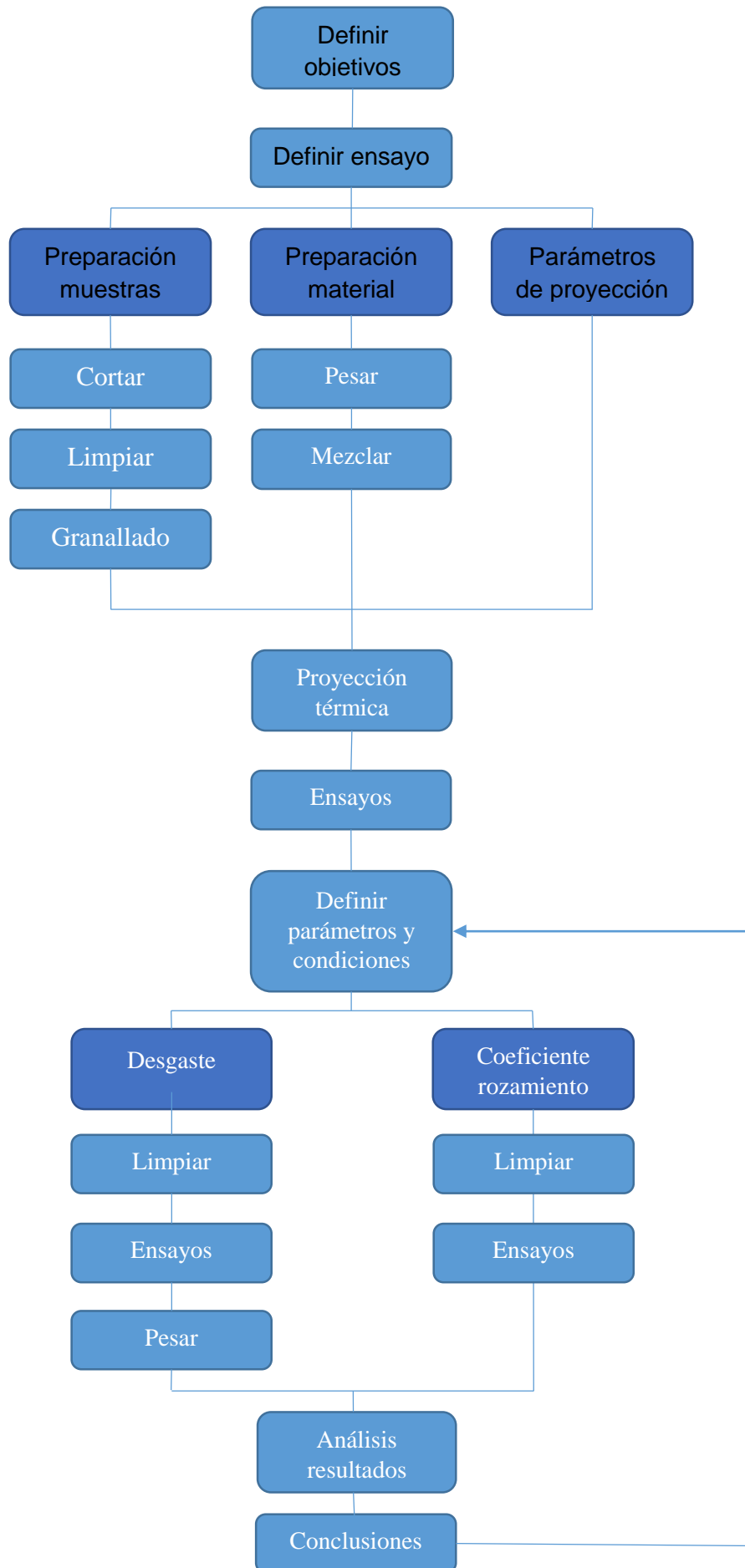
Para garantizar la finalización del proyecto en los plazos que se tienen, se planifican las tareas a realizar, en el tiempo disponible.

Se establecerá un plan de trabajo, organizado mediante una tabla (tabla 6.1) donde, en primer lugar se tendrá una lista con las tareas más importantes. Marcaremos las fechas de inicio y fin, así como los hitos del proyecto.

Después mediante un diagrama (figura 6.1) se indicará el orden lógico de la realización de los ensayos.

	Tarea	Fecha inicio	Fecha fin	Hito
1	Búsqueda de información	09/12/2013	31/01/2014	
2	Aprender funcionamiento de las máquinas	03/01/2014	05/01/2014	
3	Ensayos laboratorio	05/01/2014	18/03/2014	SÍ
4	Evaluar resultados. Gráficas	18/03/2014	02/04/2014	
5	Revisión final del proyecto	07/07/2014		SÍ
6	Presentación del proyecto	10/07/2014		Sí

*Tabla 6.1. Lista de tareas con fechas previstas*



## 7. Parte experimental

A continuación, se describirán los pasos realizados para llevar a cabo los ensayos en el laboratorio. Una de las principales dificultades a la que nos enfrentamos al hacer los ensayos en el laboratorio, es el conseguir las mismas condiciones que en el entorno real de desgaste. Se intentará mediante los siguientes pasos simular lo más parecido posible, el entorno real. Para que los resultados sean lo más fiable posible.

Dentro de la parte experimental de nuestro proyecto tenemos tres partes bien diferenciadas

- Preparación de las muestras.
- Aplicación del recubrimiento.
- Los ensayos en el tribómetro.

### Preparación de las muestras

La preparación de las muestras es muy importante, tanto la geometría, como las superficies juegan un papel muy importante en la calidad del recubrimiento.

#### *Cortar los pins*

En primer lugar, para obtener las muestras, se cortará una barra de Acero Inoxidable AISI 304 de 8 mm de diámetro, en trozos de 17 mm de longitud. Se cortará mediante una tronzadora industrial (Figura 7.1), con una muela de abrasivos, para no sufra deformaciones ni adquiera dureza por acritud. La máquina utiliza taladrina, que es un producto compuesto por agua y aceites que se utiliza como lubricante y refrigerante.



*Figura 7.1. Tronzadora de disco abrasivo Abrasimet 2*

### *Desbaste*

Seguidamente, se quitan las rebabas y se matan los cantos de las muestras, para conseguir que el recubrimiento se adhiera uniformemente en todas las zonas. Se hará mediante con una debastadora (Figura 7.2), que posee un disco abrasivo con una granulometría de 240 granos/mm<sup>2</sup>



*Figura 7.2. Desbastadora Metaserv 2000*

### *Limpieza con ultrasonidos*

Es muy importante la limpieza de la superficie, para la perfecta adherencia del recubrimiento, por ello las limpiaremos con ultrasonidos. Ponemos las piezas en acetona e introducimos el bote en la máquina de limpieza por ultrasonidos. La máquina (Figura 7.3) se encarga de generar las ondas ultrasónicas las cuales se propagan por la solución. Durante la fase de baja presión se producen pequeñas burbujas que más tarde, durante la fase de alta presión estallan produciendo así la limpieza superficial.



*Figura 7.3. Limpiadora mediante ultrasonidos Branson 2210*

*Preparar material a proyectar*

Luego, se preparan las mezclas de los polvos de material, para conseguir las aleaciones deseadas, los materiales de los que se disponen son:

- NiCrBSi: Eutalloy RW Powder. PE 3307 → Castolin
- $\text{Al}_2\text{O}_3$ : Praxair
- $\text{Zr}_2\text{O}_3$ : Praxair

Partiremos de la aleación comercial de base níquel, NiCrBSi, cuya composición es la que vemos en la tabla 7.1. A esta aleación se le añadirán diferentes porcentajes de alúmina y de zirconia, cuyo porcentaje en peso se ve en la tabla 7.2. Finalmente, se nos quedan 5 materiales para el estudio:

Ni	Cr	B	Si
83 %	10%	3.5%	3.5%

*Tabla 7.1. Composición NiCrBSi*

Muestra	Cantidad NiCrBSi (g)	Cantidad $\text{Al}_2\text{O}_3$ (g)	Cantidad $\text{Zr}_2\text{O}_3$ (g)
1. NiCrBSi	100	-	-
2. NiCrBSi + 1% $\text{Al}_2\text{O}_3$	99	1	-
3. NiCrBSi + 2% $\text{Al}_2\text{O}_3$	98	2	-
4. NiCrBSi + 1% $\text{Zr}_2\text{O}_3$	99	-	1
5. NiCrBSi + 2% $\text{Zr}_2\text{O}_3$	98	-	2

*Tabla. 7.2. Porcentaje en peso de cada material*

Se pesará el polvo necesario para cada material, con la ayuda de una báscula de precisión. Y se lleva a una mezcladora por centrifugado (Figura 7.4), la cual se encargará de mezclar de forma homogénea los materiales.



*Figura 7.4. Mezcladora por centrifugado Mixyvac*

### Granallado

Se granallan las muestras con una chorreadora (Imagen X), esta máquina mediante aire comprimido lanza una gran cantidad de partículas de corindón (alúmina). El fin de esta operación es conseguir una superficie rugosa para la perfecta adherencia del recubrimiento, ya que tiene un anclaje mecánico. La máquina utilizada es la Chorreadora Mega. Sistema seco

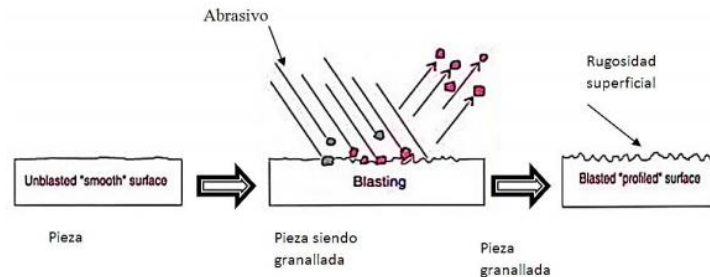


Figura 7.5. Esquema del proceso de granallado



Figura 7.6. Chorreadora MEGA 4

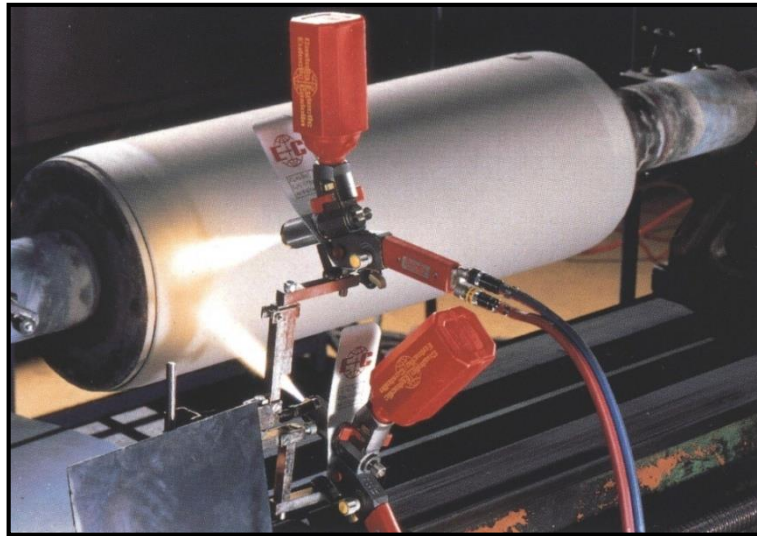
### Limpieza

Después del granallado se vuelve a hacer una limpieza de ultrasonidos. Se procederá del mismo modo que se ha hecho anteriormente.

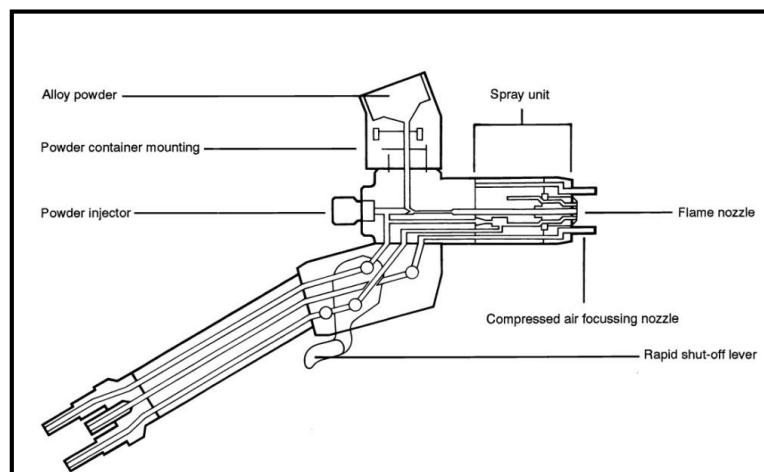
### Aplicación de recubrimiento

#### *Proyección térmica*

A continuación, se aplicará el recubrimiento mediante proyección térmica y como se ha dicho anteriormente, utilizaremos la variante oxifuel, para ello utilizaremos la pistola Castodyn eutectic DS8000 y con una boquilla de 20SM (Figura 7.7 y 7.8)



*Figura 7.7. Pistola de proyección térmica, Castodyn eutectic DS8000*



*Imagen 7.8. Esquema de la pistola Castodyn DS8000*



### *Refundido*

Para terminar la deposición del recubrimiento se hará un refundido con llama. Cuyo objetivo principal es, homogeneizar la microestructura del recubrimiento, reduciendo los poros e incrementando la adherencia al sustrato.

### Ensayos

#### *Ensayos del tribómetro*

Una vez aplicado el recubrimiento procederemos a realizar los ensayos en el tribómetro.

El tribómetro es una máquina que simula las condiciones de desgaste que se dan en un entorno real. Tiene varios parámetros a controlar, y mide el coeficiente de fricción.

Básicamente, el ensayo consiste en fijar la muestra en un brazo, aplicarle la carga con la que se quiere realizar el ensayo y hacer girar el disco, para conseguir un movimiento entre las superficies.

Existen distintos tipos y configuraciones de tribómetros, nosotros usaremos en pin on disk (Figura 7.9)

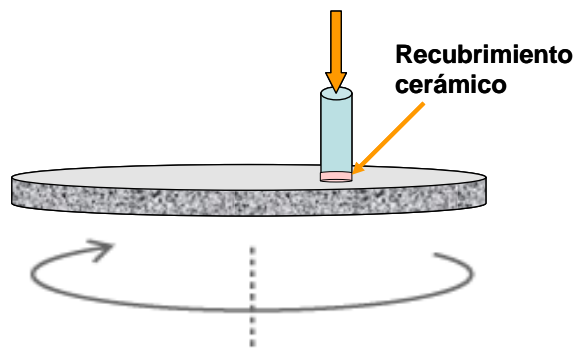


Figura 7.9

Los pasos para poner en marcha el tribómetro son los siguientes:

1. Fijar el disco y la muestra
2. Ejecutar el programa COMPEND 2000 (software con el que trabaja este tribómetro)
3. Se pone a cero el coeficiente de fricción
4. Colocar el peso e introducirlo en el programa
5. Posición del pin y la velocidad
6. Bajar el brazo y encender el motor



*Figura 7.10. (a) tribómetro Pilint&Partners TE79/P y (b) detalle del disco del ensayo*

Realizaremos dos tipos de ensayos: el primero, un estudio del coeficiente de fricción y el segundo un estudio de la pérdida de masa.

Para analizar el coeficiente de fricción someteremos las muestras a ensayos con diferentes velocidades, 30, 40, 50, 60 rpm por muestra, en un radio de 30 mm, para ver como evoluciona. Como parámetro fijo tendremos la carga, que será de 11 N.

Para analizar la pérdida de masa se hará un ensayo de desgaste. El ensayo se irá parando para pesar la pieza cada 100 m, por lo tanto se nos quedarán cuatro masas distintas por material: la inicial, cuando lleve 100 m, cuando lleve 200 m y cuando lleve 300 m. Como parámetros fijos tendremos una carga axial de 11 N y una velocidad de 40 rpm.

En las siguientes tablas (tabla 7.3 y 7.4) se muestra de manera más clara los ensayos que se van a realizar.

Material	Carga (N)	Radio (mm)	Velocidad (rpm)
NiCrBSi	11	30	30
			40
			60
			80
NiCrBSi + 1% $\text{Al}_2\text{O}_3$			30
			40
			60
			80
NiCrBSi + 2 % $\text{Al}_2\text{O}_3$			30
			40
			60
			80
NiCrBSi + 1 % $\text{Zr}_2\text{O}_3$			30
			40
			60
			80
NiCrBSi + 2 % $\text{Zr}_2\text{O}_3$			30
			40
			60
			80

Tabla 7.3. Ensayos a realizar para el coeficiente de rozamiento

Material	Carga (N)	Radio (mm)	Velocidad (rpm)	Distancia (m)
NiCrBSi	11	30	40	100
				200
				300
NiCrBSi + 1 % $\text{Al}_2\text{O}_3$				100
				200
				300
NiCrBSi + 2 % $\text{Al}_2\text{O}_3$				100
				200
				300
NiCrBSi + 1 % $\text{Zr}_2\text{O}_3$				100
				200
				300
NiCrBSi + 2 % $\text{Zr}_2\text{O}_3$				100
				200
				300

Tabla 7.4. Ensayos a realizar para evaluar el desgaste

## 8. Análisis de resultados

A continuación se analizarán los resultados obtenidos en los ensayos; se hará mediante tablas de datos, gráficas y fórmulas. Se estudiarán los recubrimientos desde varios aspectos diferentes con la intención de que la elección del recubrimiento sea el más adecuado.

Como se ha dicho anteriormente se han realizado dos tipos de ensayos: de desgaste y de coeficiente de rozamiento.

### Ensayos de desgaste

NiCrBSi (V= 40 rpm y C =11N)				
Distancia (m)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	% Pérdida de masa
100	7,5460	7,5459	0,001	0,0132
200	7,5459	7,5459	0,001	0,0132
300	7,5459	7,5457	0,003	0,0397

Tabla 8.1. Resultados ensayo de desgaste NiCrBSi

NiCrBSi + 1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (V= 40 rpm y C =11N)				
Distancia (m)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	% Pérdida de masa
100	7,4498	7,4487	0,002	0,0268
200	7,4487	7,4484	0,005	0,0671
300	7,4484	7,4479	0,010	0,1342

Tabla 8.2. Resultados ensayo de desgaste NiCrBSi + 1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

NiCrBSi + 2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (V= 40 rpm y C =11N)				
Distancia (m)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	% Pérdida de masa
100	7,5142	7,5133	0,009	0,1197
200	7,5133	7,5131	0,011	0,1464
300	7,5131	7,5130	0,012	0,1597

Tabla 8.3. Resultados ensayo de desgaste NiCrBSi + 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

NiCrBSi + 1% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (V= 40 rpm y C =11N)				
Distancia (m)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	% Pérdida de masa
100	7,2532	7,2519	0,013	0,1792
200	7,2519	7,2519	0,017	0,2344
300	7,2519	7,2512	0,020	0,2757

Tabla 8.4. Resultados ensayo de desgaste NiCrBSi + 1% Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

NiCrBSi + 1% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (V= 40 rpm y C =11N)				
Distancia (m)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	% Pérdida de masa
100	7,3939	7,3931	0,008	0,1082
200	7,3931	7,3928	0,011	0,1488
300	7,3928	7,3926	0,013	0,1758

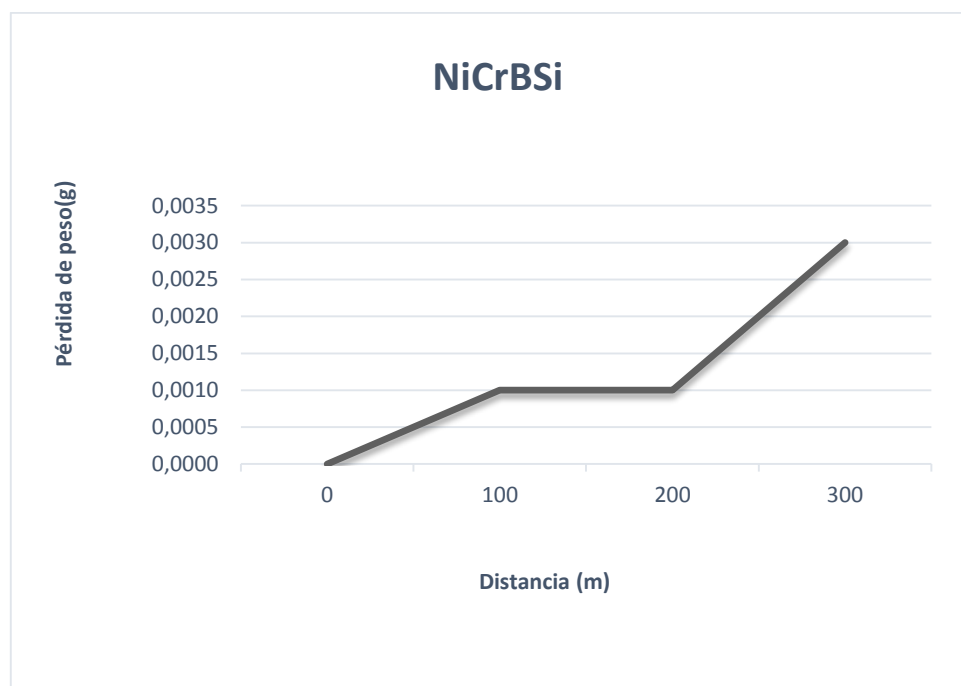
Tabla 8.5. Resultados ensayo de desgaste NiCrBSi + 1% Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Figura 8.1 Pérdida de peso – distancia. NiCrBSi

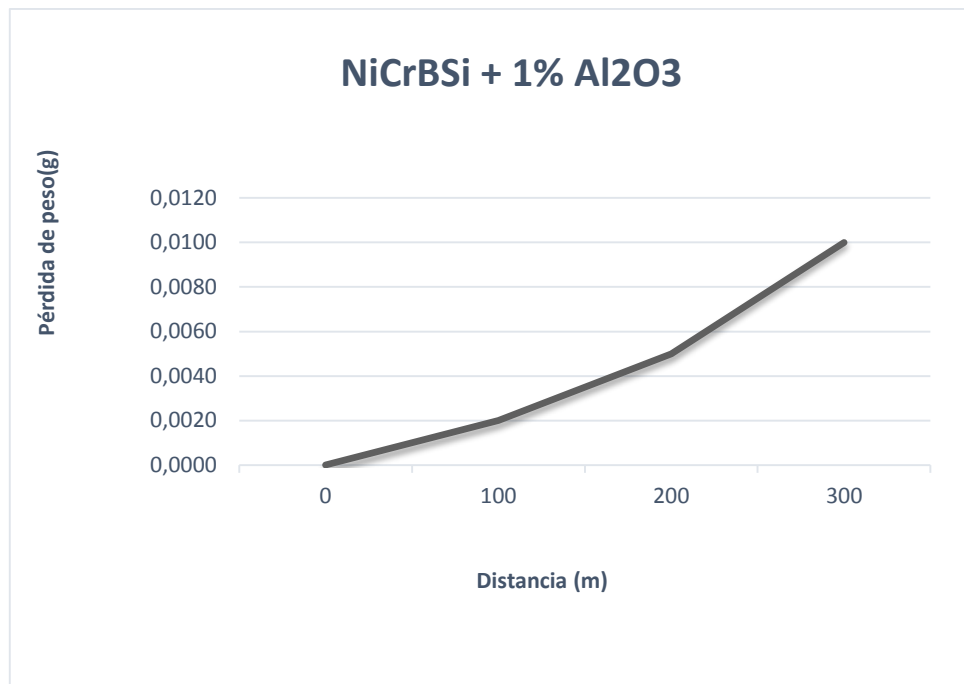


Figura 8.2. Pérdida de peso – distancia. NiCrBSi + 1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

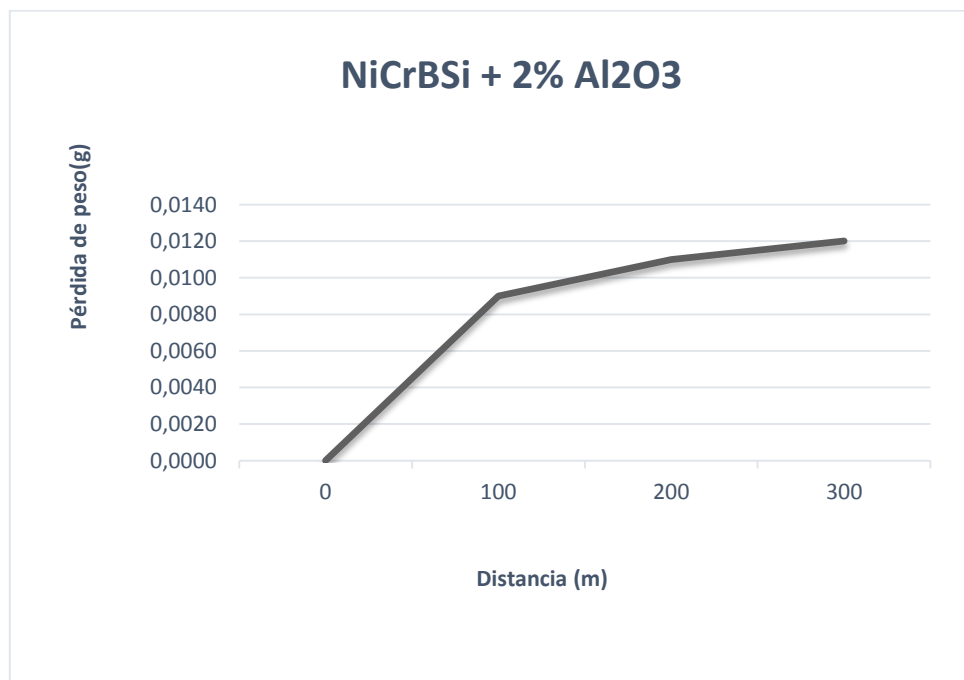


Figura 8.3. Pérdida de peso – distancia. NiCrBSi + 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

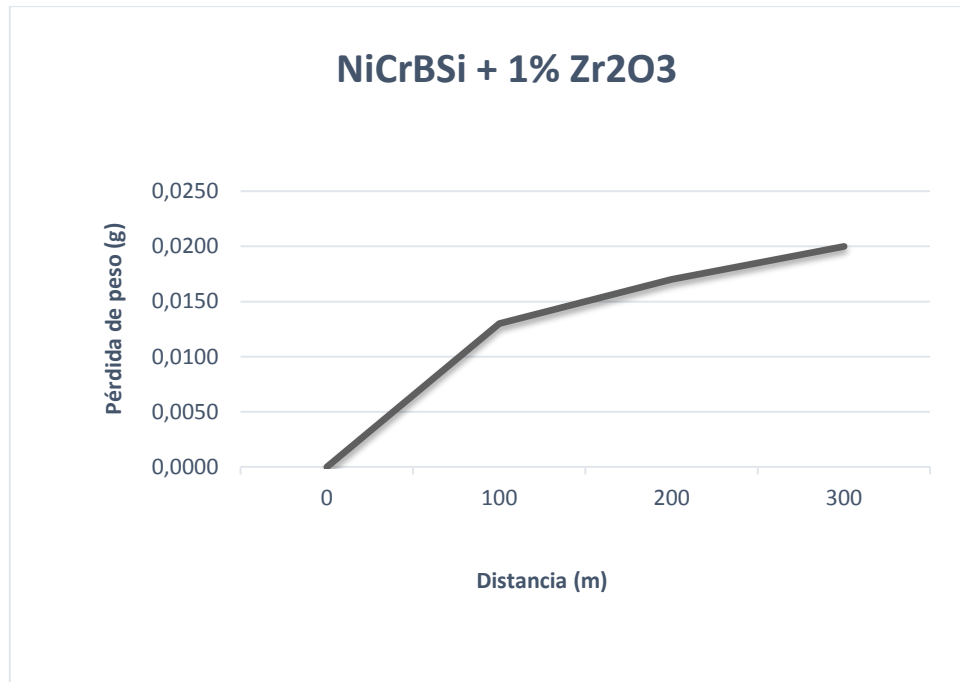


Figura 8.4. Pérdida de peso – distancia. NiCrBSi + 1% Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

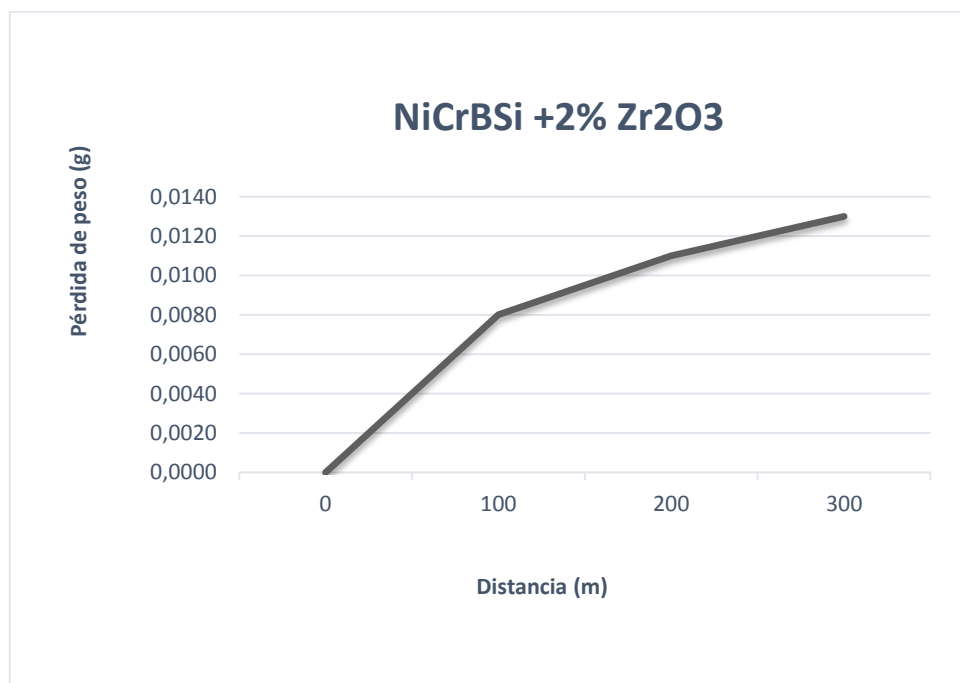


Figura 8.5. Pérdida de peso – distancia. NiCrBSi + 2% Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

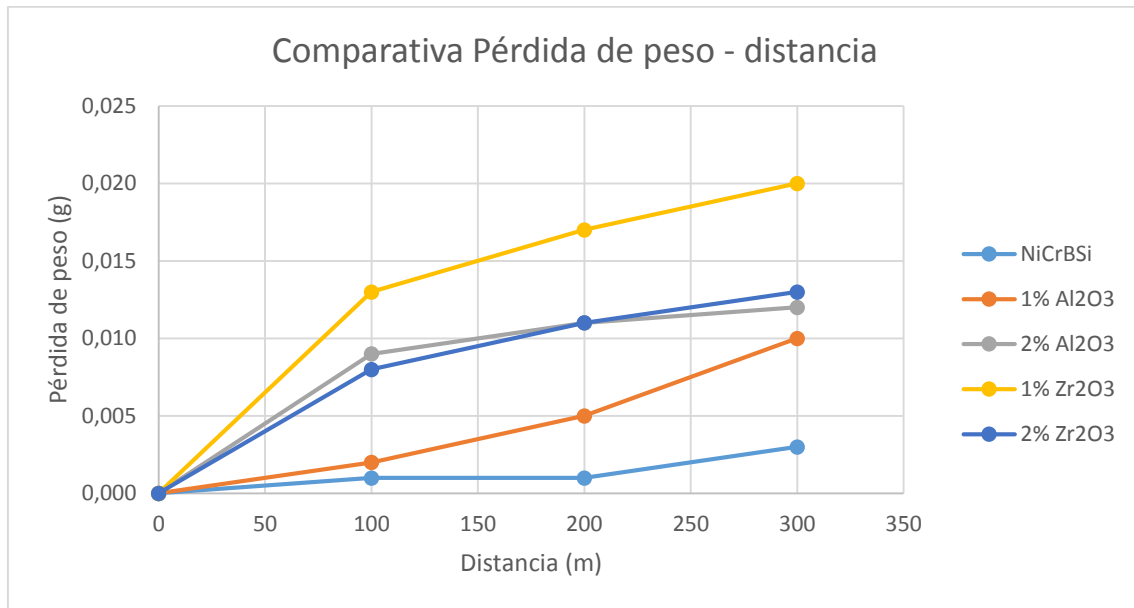


Figura 8.6 Comparativo de tendencia de desgaste

Pendiente	
NiCrBSi	0,000020
NiCrBSi + 1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,000040
NiCrBSi + 2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,000015
NiCrBSi + 1% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,000035
NiCrBSi + 2% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,000025

Tabla 8.6. Pendiente de la gráfica

En las tablas y gráficas anteriores, se relaciona la pérdida de masa con la distancia recorrida por las muestras. Como se observa en las gráficas, y como es normal, a mayor distancia recorrida mayor será la pérdida de masa.

Lo importante de estos gráficos es ver la tendencia de desgaste que tienen, y a partir de ahí comparar cual es el material con mejor comportamiento. En la tabla 8.6, se han calculado las pendientes correspondientes a cada material. Ordenamos los materiales de menor a mayor pendiente, por lo tanto se nos queda como:

- NiCrBSi + 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- NiCrBSi
- NiCrBSi + 2% Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- NiCrBSi + 1% Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- NiCrBSi + 1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



A la vista de estos resultados, podemos concluir que, el material con mejor comportamiento de desgaste será el material con un 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$

### Ensayos de coeficiente de rozamiento

NiCrBSi	
Velocidad (rpm)	Coeficiente de fricción ( $\mu$ )
30	0,117
40	0,115
60	0,099
80	0,090

Tabla 8.7. Coef. de fricción NiCrBSi

NiCrBSi + 1% $\text{Al}_2\text{O}_3$	
Velocidad (rpm)	Coeficiente de fricción ( $\mu$ )
30	0,114
40	0,104
60	0,090
80	0,084

Tabla 8.8. Coef. de fricción 1%  $\text{Al}_2\text{O}_3$

NiCrBSi + 2% $\text{Al}_2\text{O}_3$	
Velocidad (rpm)	Coeficiente de fricción ( $\mu$ )
30	0,129
40	0,119
60	0,113
80	0,104

Tabla 8.9. Coef. de fricción 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$

NiCrBSi + 1% $\text{Zr}_2\text{O}_3$	
Velocidad (rpm)	Coeficiente de fricción ( $\mu$ )
30	0,551
40	0,449
60	0,461
80	0,444

Tabla 8.10. Coef. de fricción 1%  $\text{Zr}_2\text{O}_3$

NiCrBSi + 2% $\text{Zr}_2\text{O}_3$	
Velocidad (rpm)	Coeficiente de fricción ( $\mu$ )
30	0,440
40	0,444
60	0,442
80	0,450

Tabla 8.11. Coef. de fricción 2%  $\text{Zr}_2\text{O}_3$

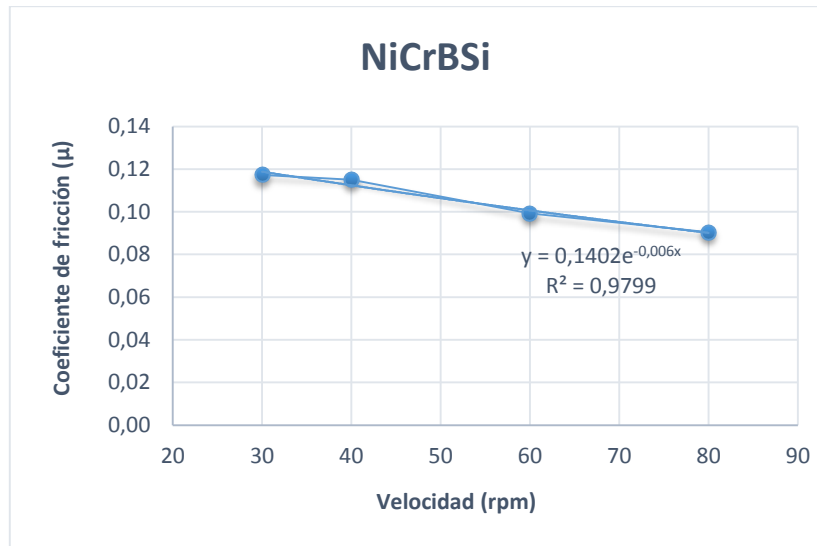


Figura 8.7. Coeficiente de fricción - velocidad. NiCrBSi

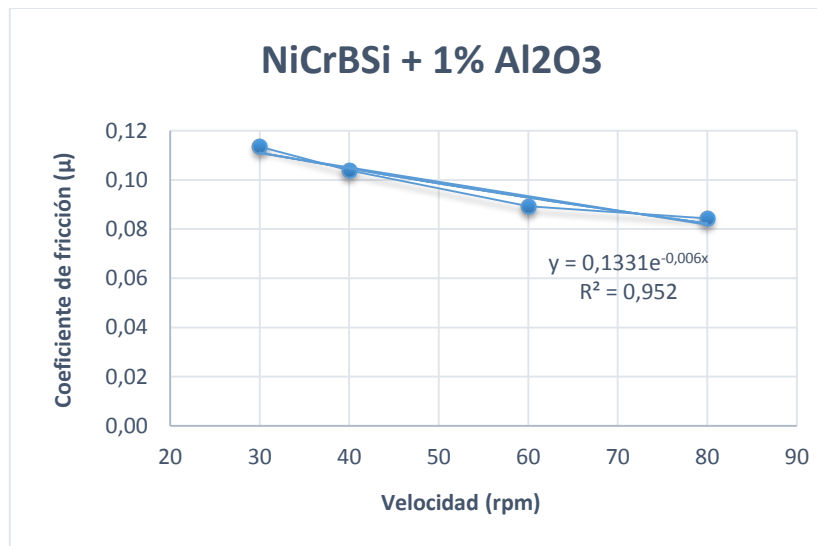


Figura 8.8. Coeficiente de fricción - velocidad. 1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

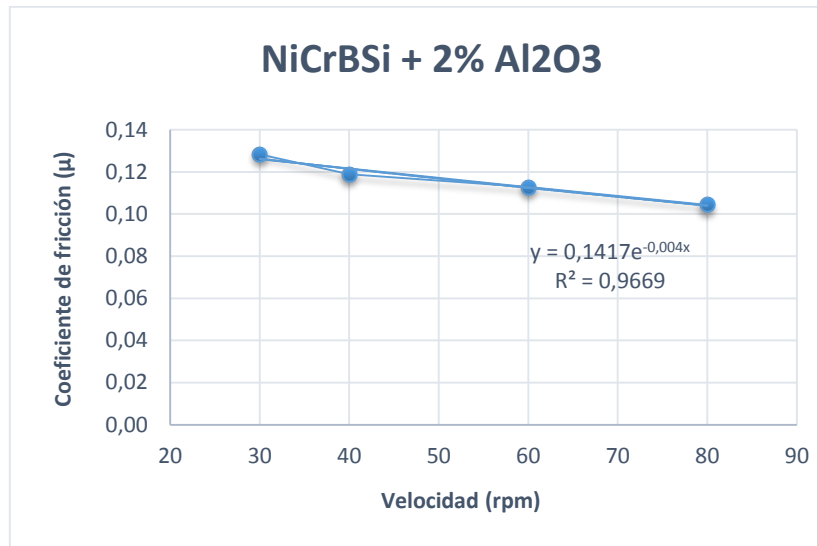


Figura 8.9. Coeficiente de fricción - velocidad. 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

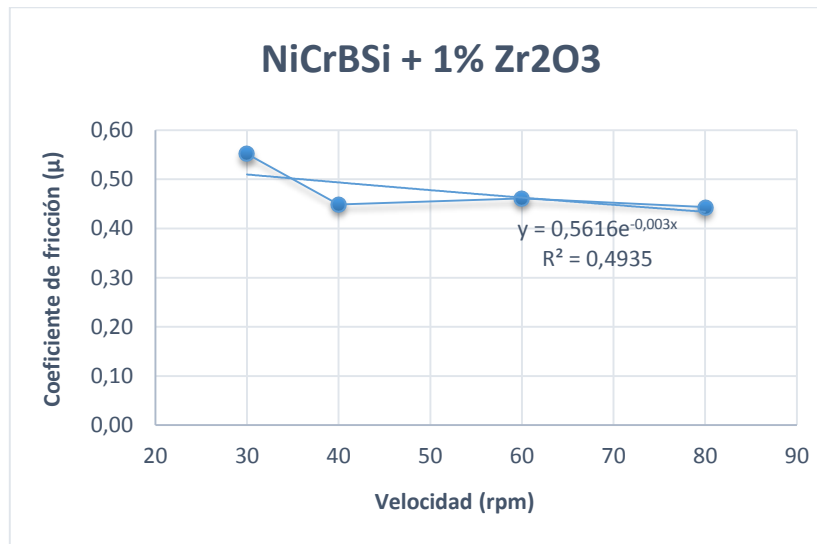


Figura 8.10. Coeficiente de fricción - velocidad 1% Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

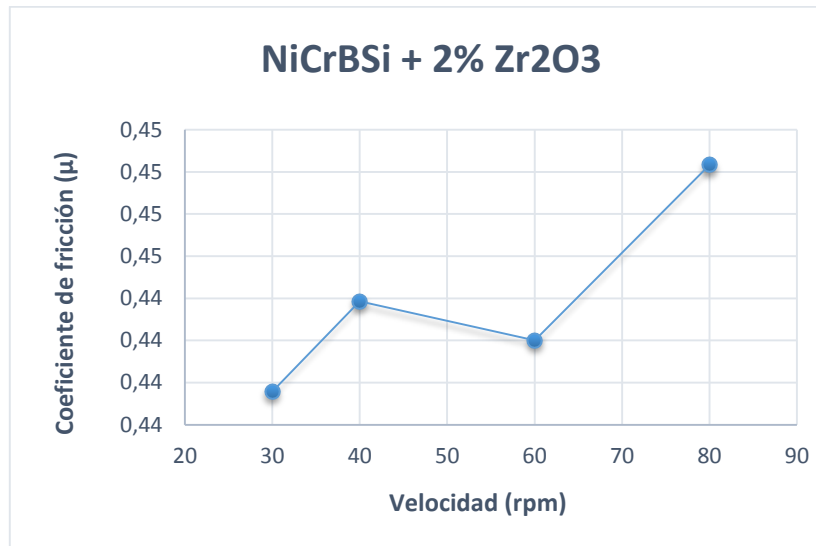


Figura 8.11. Coeficiente de fricción - velocidad 2% Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

En las tablas y gráficos anteriores, tenemos la relación entre el coeficiente de fricción y la velocidad. Se puede observar, excepto en el 2% Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, como a medida que sube la velocidad el coeficiente de fricción disminuye, esto se explicó en el punto 2.2.1 de antecedentes.

Los gráficos tienen una tendencia exponencial, en cada gráfico se ha puesto la  $R^2$ , que indica el ajuste de la gráfica exponencial en los datos, en el caso del NiCrBSi, NiCrBSi + 1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y NiCrBSi + 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> el ajuste es bastante alto.

Mediante unas fórmulas vamos a analizar:

- La influencia de la velocidad en el coeficiente de rozamiento
- Evolución de la temperatura en las superficies de fricción
- El coeficiente de rozamiento cohesivo

## INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO EN EL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO

Como ya explicó en el punto de antecedentes (2.2.1), el coeficiente de rozamiento respecto a la velocidad tiene un comportamiento exponencial, al principio el coeficiente baja considerablemente pero poco a poco tiende a ser constante. Con la ayuda de la fórmula que esta a continuación vamos a ajustar los datos a dicha exponencial.

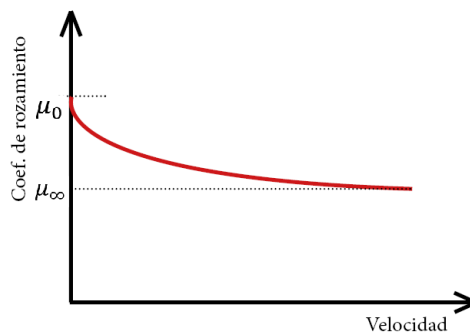


Figura 8.12. Gráfica coeficiente de rozamiento - velocidad

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) * e^{-kp*v}$$

Kp	
NiCrBSi	5,92
NiCrBSi + 1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,53
NiCrBSi + 2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,45
NiCrBSi + 1% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,65
NiCrBSi + 2% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	

Tabla 8.12. Pendiente

- Como NiCrBSi + 2% Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no tiene un comportamiento exponencial no aplicaremos la fórmula.

La correlación entre el coeficiente de rozamiento y la velocidad, responde a un modelo matemático de acuerdo con la ecuación anterior.

NiCrBSi	$\mu = 0,090 + 0,027 * e^{-5,92v}$
NiCrBSi + 1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\mu = 0,084 + 0,030 * e^{-9,53*v}$
NiCrBSi + 2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\mu = 0,104 + 0,025 * e^{-5,45*v}$
NiCrBSi + 1% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\mu = 0,444 + 0,107 * e^{-9,65*v}$
NiCrBSi + 2% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	

## EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS SUPERFICIES DE FRICCIÓN

En todo contacto de dos superficies con contacto existe una fricción, que hace que aumente la temperatura. Esta temperatura, conlleva una pérdida de las características resistentes de los materiales.

$$\theta = \frac{\mu * v * N}{8 * \alpha * a}$$

Donde:

$\theta \rightarrow$  Incremento de temperatura en las superficies rozantes

$\mu \rightarrow$  Coeficiente de rozamiento

$N \rightarrow$  Carga aplicada (N)

$\alpha \rightarrow$  Conductividad térmica ( $\frac{W}{K*m}$ )

$a \rightarrow$  Área de la superficie (m<sup>2</sup>)

	30	40	60	80
NiCrBSi	5,7745	7,5657	9,7681	11,8449
NiCrBSi + 1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,6018	6,8344	8,8012	11,1079
NiCrBSi + 2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,3273	7,8145	11,1297	13,7269
NiCrBSi + 1% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,209	29,5043	45,4696	58,3428
NiCrBSi + 2% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,9654	29,1996	43,6114	59,2684

Tabla 8.13. Incremento de la temperatura en la superficie.

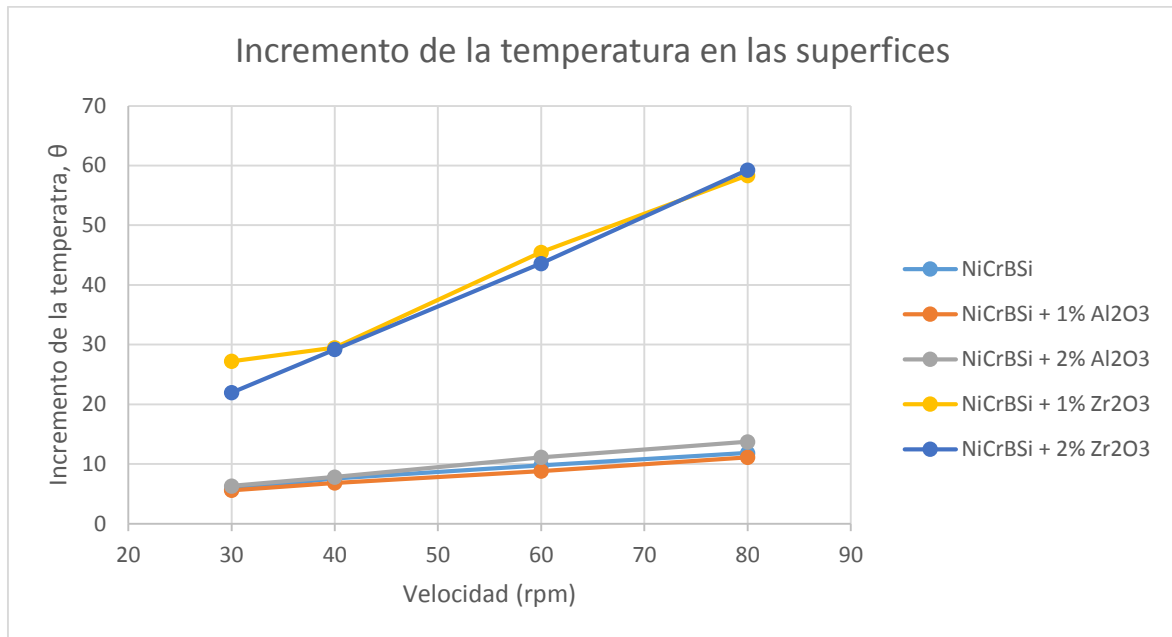


Figura 8.13. Incremento de la temperatura en función de la velocidad

A la vista de los resultados podemos ver como a medida que aumentamos la velocidad, la temperatura en las superficies aumenta. Siendo las dos muestras aleadas con zirconia las que mayor incremento tienen, además estas dos son claramente más alta que el resto de las muestras, que están en un rango similar.

## COEFICIENTE DE ROZAMIENTO COHESIVO, BOWDEN

Tenemos básicamente dos tipos de desgaste en las superficies:

- Desgaste cohesivo
- Desgaste abrasivo, o interferencial

En el siguiente gráfico, podemos ver la relación de estos dos desgaste en función de la rugosidad, en nuestro caso queremos que tenga un desgaste bajo en adherencia.

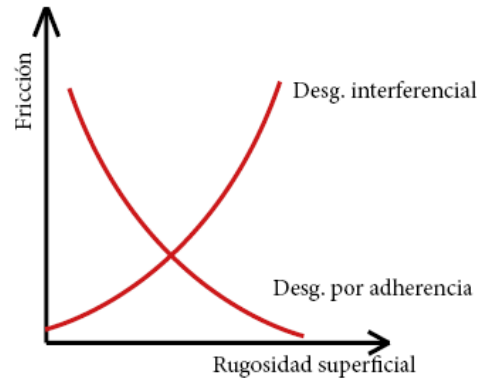


Figura 8.14. Tipo de desgaste en función de la rugosidad

Mediante la siguiente fórmula evaluaremos cual es el desgaste predominante en nuestro caso. En la fórmula debemos de calcular la  $C$ , se obtendrán unos valores comprendidos entre 0 y 1, como hemos indicado antes, nos interesan valores bajos de adherencia, por lo tanto, cercanos a 1.

$$\mu = \frac{C}{\alpha \sqrt{(1 - 2C)}}$$

Donde:

$\mu \rightarrow$  Coeficiente de rozamiento

$\alpha \rightarrow$  Conductividad térmica ( $\frac{W}{K \cdot m}$ )

$C \rightarrow$  Cte

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla

	30	40	60	80
NiCrBSi	0,4967	0,4965	0,4954	0,4944
NiCrBSi + 1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4965	0,4958	0,4944	0,4936
NiCrBSi + 2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4972	0,4968	0,4964	0,4958
NiCrBSi + 1% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4998	0,4997	0,4997	0,4997
NiCrBSi + 2% Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997

Tabla 8.14. Resultados del tipo de desgaste

A la vista de los resultados, podemos concluir que este factor no nos sirve para inclinarnos hacia ninguno de los recubrimientos, ya que los resultados son prácticamente iguales. Estos valores se encuentran en un rango intermedio, es decir ni predomina el desgaste adhesivo ni el interferencial.



## **9. Aplicación del recubrimiento en un molde**

Para la mejor comprensión de la aplicación se explicará paso por paso un caso práctico de recuperación de un molde.

Los planos de dicho molde, se encuentran en el plano 1. Como únicamente tiene defectos en el plato cavidad, este será el que hay que analizar.

El primer paso, a realizar para recuperar el molde, será hacer un estudio de las grietas que tiene. En el detalle del plano 1, tenemos una vista de detalle de la grieta más grande encontrada. Esta tiene unas dimensiones de 0,78 mm de ancho y 0,15 mm de profundidad.

Una vez evaluado los problemas y las condiciones del molde nos ponemos a realizar la recuperación.

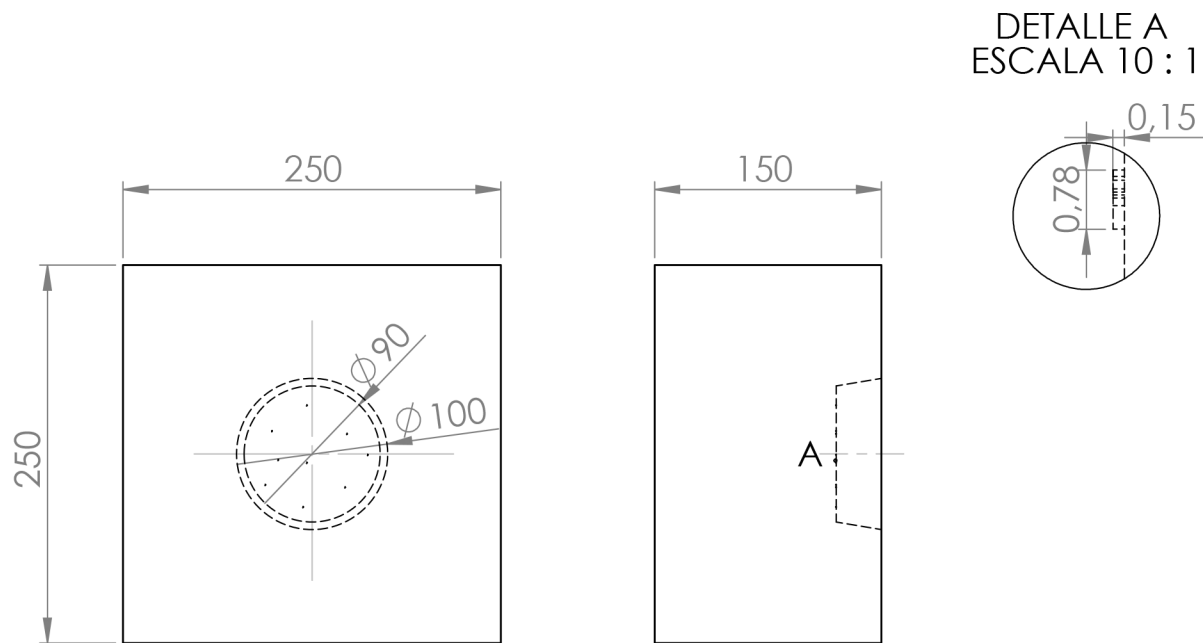
Lo siguiente que haremos será mecanizar una profundidad de 0,20 mm en toda superficie del plato dañado.


Luego, enmascararemos la parte del molde que no vaya a tener recubrimiento, para que los procesos siguientes no afecten a estas partes. Proseguiremos con la metodología especificada en el proyecto, para la preparación y proyección de la muestra. Se proyectará una capa de recubrimiento de 0,25 mm de espesor.

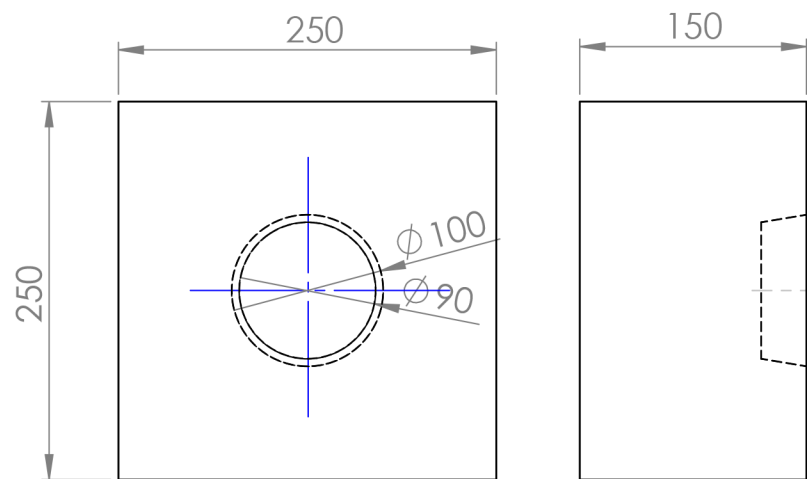
Por último, se pulirá, para conseguir el acabado que requiere un molde de inyección. En el plano 2 tenemos la parte del molde recuperada, lista para ser utilizada.


## 10. Conclusiones

- Con un porcentaje de alúmina de 1%, la tendencia de desgaste no se modifica respecto al material sin refuerzo.
- Con un porcentaje de 2% de alúmina la tendencia al desgaste cambia, tiende a estabilizarse.
- Las muestras con zirconia también cambian de comportamiento, tienden a estabilizarse, pero de forma mucho menos pronunciada. Pero también es verdad que tiene una tasa de desgaste mucho mayor que el material sin refuerzo.
- Aunque levemente, la muestra con 2% de zirconia mejora con respecto a la que lleva 1% de zirconia. Sería interesante continuar la investigación con % de zirconia mayores.
- El recubrimiento de 2% de alúmina, es el que produce una mayor reducción del coeficiente de fricción con la velocidad. Y es el único que se encuentra por encima del material sin refuerzo.
- En los recubrimientos con zirconia se ha observado un alto incremento de la temperatura, para mayores velocidades de ensayos. Este dato concuerda con la tasa tan alta de desgaste observada anteriormente.
- Tanto en el recubrimiento sin refuerzo, como en los reforzados con alúmina no tiene apenas incremento de temperatura, cuando tenemos mayores velocidades de ensayo, además entre ellas tampoco se aprecia diferencia.
- Con ninguno de los aditivos cerámicos se ha modificado el modo de rozamiento, siendo en todos los casos, un tipo intermedio entre adhesivo e interferencial.
- A la vista de los resultados, podemos concluir que el mejor recubrimiento obtenido es el NiCrBSi + 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- Para estudios posteriores sería interesante ampliar este estudio a mayores porcentajes de los tratados en este trabajo.



Fecha: Julio 2014		Molde desgastado	Plano nº: 1
			Hoja nº: 1
	1: 5	Desarrollo de recubrimientos metal-cerámica para mejorar la resistencia al desgaste de los molde de inyección	
	mm		



Fecha: Julio 2014		Molde recuperado	Plano nº: 2
			Hoja nº: 2
	1: 5	Desarrollo de recubrimientos metal-cerámica para mejorar la resistencia al desgaste de los molde de inyección	
	mm		

## **12. Pliego de condiciones**

### **12.1 Condiciones y parámetros en la realización de los ensayos en el laboratorio**

El control de los parámetros y de las condiciones en las que se realizan los ensayos en el laboratorio es muy importantes, para asegurar la calidad y la fiabilidad de los datos obtenidos.

A continuación se van a indicar las condiciones con las que se ha trabajado, además de indicar las normas que se han tenido en cuenta para la realización de dichos ensayos.

#### **Crear de las muestras**

##### **Cortar → tronzadora**

Se han cortado las muestras en una tronzadora industrial, con muela de abrasivos, para que sufra deformación por acritud que sufriría, por ejemplo, si se hiciera con una sierra de cinta.

También se ha utilizado taladrina (agua y aceites) para que actúe como lubricante y refrigerante.

##### **Desbastar → desbastadora**

Con la desbastadora se quitan las rebabas y se matan los cantos, ya que estos son punto donde no se adhiere bien el recubrimiento. El disco abrasivo utilizado tiene una granulometría de 240 granos/mm<sup>2</sup>.

##### **Limpieza con ultrasonidos**

La limpieza con ultrasonidos se realizará sumergiendo la pieza en un bote de acetona, que se introducirá en la máquina de ultrasonidos, aquí permanecerá 5 minutos, para garantizar que queda completamente limpia.

#### **Preparar el material a proyectar**

##### **Materiales**

Los materiales estarán cerrados en sus respectivos botes, para asegurar que no se contaminan con partículas que pueda haber en el aire.

##### **Mezcladora**

Se mezclarán los materiales en polvo durante 5 min, para conseguir una mezcla completamente homogénea, esto es necesario para que después en la proyección no se quede el material mal repartido en el recubrimiento.

**Preparación de las superficies****Limpieza con ultrasonidos**

Como se ha dicho anteriormente se dejará actuar durante 5 minutos.

**Granallado**

Se realizará mediante lanzando partículas de alúmina, con la ayuda de aire comprimido, se realizará el tiempo necesario, hasta que la superficie que se quiere recubrir quede con una rugosidad homogénea.

**Proyección térmica**

En la proyección térmica, como se ha dicho anteriormente, es muy importante controlar los parámetros, ya que estos influyen directamente en la microestructura del recubrimiento y por lo tanto en el comportamiento de este.

Parámetros	Unidades	
Aire comprimido	3	bar
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	4	bar
Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	0.7	bar
Apertura de la boquilla	2	-
Distancia	100	mm

*Tabla 12.1 Parámetros de la proyección térmica*

**Ensayos en el tribómetro****Tribómetro**

Las condiciones de los ensayos se pusieron en la parte experimental, tablas 7.3 y 7.4.

**Báscula de precisión**

Esta máquina es muy sensible, estamos trabajando con decimas de miligramos, además lo que estamos estudiando es la pérdida de masa de las muestras, por lo tanto, será necesario, para asegurarnos de tener bien tomadas las medidas tener un serie de pautas a la hora de tomar las medidas.

Será necesario comprobar, antes y después, de realizar el peso de la muestra que la balanza se ponga a cero, sino será necesario la limpieza de esta.

## **13. Viabilidad**

### **13.1 Viabilidad técnica**

La viabilidad técnica a la hora de recubrir los moldes, dependerá del molde en cuestión, es decir, se tendrá que comprobar, en primer lugar, que no nos encontremos ante ninguna de las limitaciones de las técnicas que vamos a usar: espesor máximo admisible del recubrimiento, geometrías, etc

Si cumple con las limitaciones propias de las técnicas, se puede afirmar que el proceso es totalmente viable, ya que existen los recursos y técnicas necesarios para su realización. El proceso sería el desarrollado en el proyecto.

### **13.2 Viabilidad económica**

La viabilidad económica, como es lógico, se desarrollará en cada aplicación, en función de los daños que tenga, el coste del molde, la complejidad...

Otro aspecto importante, es el tiempo de reparación del molde. Puede darse la situación de que estos tiempos sean muy grandes, y sea necesario para la producción durante mucho tiempo. Estos costes de parada puede que sean mayores que lo que nos ahorramos recuperando el molde, por lo tanto diremos que no es viable económicamente.

### **13.3 Viabilidad legal**

Se han ido consultando todas las normas necesarias para la realización del proyecto. Podemos asegurar que no existe ningún motivo legal que nos impida realizar el proyecto.

## 14. Estado de mediciones y presupuesto

### Evaluación del molde

Máquina	Coste total de la máquina (€)	Estimación coste por hora (€/h)	Horas de uso (h)	Coste (€)
Equipo de partículas magnéticas	20.000	0,60	2,00	1,20

Tabla 14.1. Coste de la evaluación del molde

### Preparación de la superficie

Máquina	Coste total de la máquina (€)	Estimación coste por hora (€/h)	Horas de uso (h)	Coste (€)
Fresadora	6.000	2,00	1,00	2,00
Chorroadora	6.000	2,00	0,25	0,50
Mezcladora	2.100	0,17	0,08	0,02
Báscula de precisión	320	0,03	0,05	0,0015
Total				2,52

Tabla 14.2. Coste de preparación de la superficie

### Proyección térmica

Máquina	Coste total de la máquina (€)	Estimación coste por hora (€/h)	Horas de uso (h)	Coste (€)
Conjunto de proyección térmica	10.000	0,84	0,25	0,21
Total				0,21

Tabla 14.3. Coste de la proyección térmica

### Rectificado y ajuste de tolerancias

Máquina	Coste total de la máquina (€)	Estimación coste por hora (€/h)	Horas de uso (h)	Coste (€)
Rectificadora	6.000	2,00	1,00	2,00
Total				2,00

Tabla 14.4. Coste del rectificado y ajuste de tolerancias



**Material para recubrir**

Material	Precio (€ / kg)	Cantidad usada (Kg)	TOTAL
NiCrBSi	75	0,00395528	0,296
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35	0,00008072	0,002
			0,30

Tabla 14.5. Coste de los materiales del recubrimiento

Actividad	Total
Evaluación del molde	1,20
Preparación de la superficie	2,52
Proyección térmica	0,21
Rectificado y ajuste de tolerancias	2,00
Material para recubrir	0,30
	6,22 €

Tabla 14.5. Costes finales según actividades

	Coste por hora	Horas que se necesita	Total de la mano de obra	Actividades + material + mano de obra
Mano de obra	30.5 €/h	14 h	427 €	433,22 €

Tabla 14.7. Coste de la mano de obra

Otros costes	Coste (€)
Costes indirectos (5%)	21,6610
Consumo eléctrico (5% de los ensayos)	0,3110
Total	455,192 €

Tabla 14.8. Otros costes

<b>IVA (21%)</b>	<b>95,59 €</b>
------------------	----------------

<b>TOTAL</b>	<b>550,78 €</b>
--------------	-----------------